QUE ES LA TEORIA DE LA RELATIVIDAD

L. Landau
Y. Rumer

Académico L. Landau, Profesor Y. Rumer

QUE ES LA TEORIA DE LA RELATIVIDAD

Octava edición

EDITORIAL · MIR · MOSCU

Primera edición 1966
Segunda edición 1969
Tercera edición 1971
Cuarta edición 1973
Quinta edición 1974
Sexta edición 1978
Séptima edición 1982
Octava edición 1985

Traducido del ruso
por el ingeniero
V. LLANOS MAS

на испанском языке

Impreso en la URSS

© Traducción al español. Editorial Mir, 1978

AL LECTOR

Han transcurrido más de cincuenta años desde el momento en que Albert Einstein creó la Teoría de la Relatividad. Esta teoría, que en cierto tiempo muchos la creían ser un juego paradójico del pensamiento, se convirtió durante el tiempo transcurrido en una de las piedras angulares de la Física. La Física moderna es tan imposible de concebir sin la teoría de la relatividad, como lo sería sin la noción actual de los átomos y de las moléculas. Es difícil hasta enumerar los fenómenos físicos que son imposibles de explicar sin la teoría de la relatividad. Basándose en esta teoría se crean aparatos tan complicados como lo son los aceleradores de partículas "elementales", se hace posible el cálculo de las reacciones nucleares, etc.

Sin embargo, desgraciadamente, la teoría de la relatividad. es muy poco conocida fuera del círculo estrecho de los especialistas. Y sucede así, porque la citada teoría pertenece al grupo de las teorías de elevado grado de dificultad. Y no se puede exigir de uno

que no sea físico el manejo natural del aparato matemático de esta teoría, por cierto, bastante complicado.

A pesar de todo esto, nosotros creemos que las nociones principales y las ideas de la teoría de la relatividad pueden ser expuestas de manera accesible para ser comprendidas por un círculo de lectores bastante amplio.

Abrigamos la esperanza de que al lector que haya leído nuestro libro, ya no le podrá venir a la cabeza la idea de que la teoría de la relatividad se reduce a la afirmación: "en el mundo todo es relativo". Por el contrario, el lector verá que la teoría de la relatividad, como cualquier otra teoría física correcta, es el estudio de una realidad objetiva, independiente de nuestros deseos y gustos. Rehusando las viejas nociones sobre el espacio, el tiempo y la masa nosotros penetramos más profundamente en el conocimiento de cómo el mundo está verdaderamente construido.

Los autores

"...siguc siendo, no obstante, indudable, que la mecánica era un calco de los movimientos lentos, reales, mientras que la nueva física es un calco de los movimientos reales que tienen lugar con prodigiosas velocidades..."

"La mutabilidad de las representaciones humanas sobre el espacio y el tiempo no refuta la realidad objetiva de uno u otro, como la mutabilidad de nuestros conocimientos científicos sobre la estructura y las formas del movimtento de la materia tampoco refuta la realidad objetiva del mundo exterior".

V. 1. LENIN

Capítulo primero

LA RELATIVIDAD A QUE ESTAMOS ACOSTUMBRADOS

¿Tiene sentido cualquier afirmación?

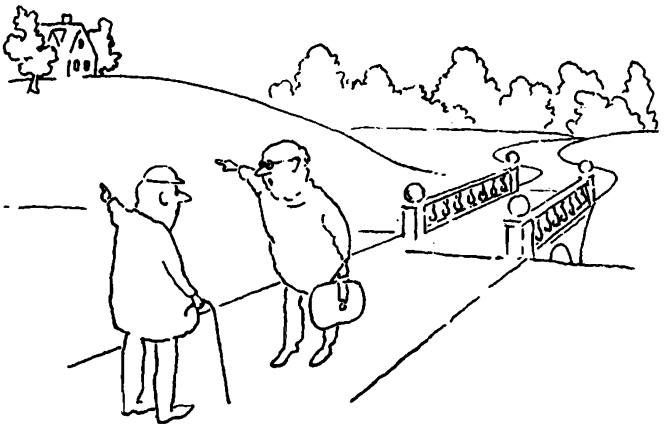
Por lo visto, no. Incluso si se cogen palabras completamente sensatas y se unen en plena conformidad con las reglas de la gramática; puede obtenerse un completo absurdo. Por ejemplo, a la afirmación "el agua es triangular" es difícil asignarle sentido alguno.

Sin embargo, por desgracia, no todos los absurdos son tan evidentes y, frecuentemente, una afirmación que a primera vista os completamente sensata, al analizarla más rigurosamente resulta ser un absurdo absoluto.

Derecha e izquierda

¿A qué lado del camino está situada la casa, a la derecha o a la izquierda? A esta pregunta no se puede responder inmediatamente.

Si uno camina del puente hacia el bosque, la casa estará al lado izquierdo y si, por el contrario, camina del bosque hacia el puente, la casa estará a la derecha. Por lo visto, al hablar del lado derecho o izquierdo del camino hay que tener en cuenta las direcciones respecto a las cuales señalamos la derecha o la izquierda.



Hablar de la orilla derecha de un río tiene sentido solamente porque la corriente del agua determina la dirección del río. Análogamente podemos afirmar que los automóviles circulan por el lado derecho, puesto que el movimiento del automóvil señala una de las direcciones de la carretera.

De esta manera, los conceptos "derecha" e "izquierda" son relativos, es decir, cobran sentido solamente después de haber señalado la dirección respecto a la cual se aplica la determinación.

¿Qué es ahora, de noche o de día?

La respuesta depende del lugar donde se haga la pregunta. Cuando en Moscú es de día, en Vladivostok es de noche. En esto no hay contradicción alguna.. Simplemente, día y noche son conceptos relativos, y no se puede contestar a la pregunta signo se indica el punto del globo terrestre respecto al cual gira la conversación.

a *b*

¿Quién
es más grande?

En el dibujo a el pastor es, evidentemente, más grande que la vaca; en el b, la vaca es más grande que el pastor. Aquí tampoco hay contradicción alguna. El asunto reside en que

estos dibujos fueron hechos por observadores desde diferentes puntos: uno se encontraba más cerca de la vaca y el otro más cerca del pastor. Para un cuadro es esencial el ángulo bajo el cual vemos los objetos y no las dimensiones verdaderas de éstos. Las dimensiones angulares de los objetos, por lo visto, son relativas. Hablar de las dimensiones angulares de los objetos es absurdo, si no se indica el punto del espacio desde el cual se efectúa la observación. Por ejemplo, decir que esta torre se ve bajo un ángulo de 45" significa no haber dicho nada. Por el contrario, la afirmación de que la torre se ve bajo un ángulo de 45" desde un punto que dista de ella 15 metros tiene sentido: de esta afirmación se deduce que su altura es de 15 metros.

Lo relativo parece ser absoluto

Si desplazamos el punto de observación a una distancia no muy grande, las dimensiones angulares cambiarán también en una magnitud pequeña. Por esto, en astronomía se emplea frecuentemente la medida angular. En el mapa estelar se indica la distancia' angular entre las estrellas, es decir, el ángulo bajo el cual se ve la distancia entre las estrellas desde la superficie de la Tierra.

Es sabido, que por mucho que nos desplacemos en la Tierra para observar el firmamento, desde cualquiera que sea el punto del globo terrestre en que nos situemos, veremos las estrellas a la misma distancia unas de otras. Semejante hecho está condicionado por las inmensas e inconcebibles distancias a que las estrellas están alejadas de nosotros, que hacen que nuestros desplazamientos por la Tierra, en comparación con tales distancias, sean insignificantes y puedan ser menospreciados. Y, por esto, en este caso concreto,

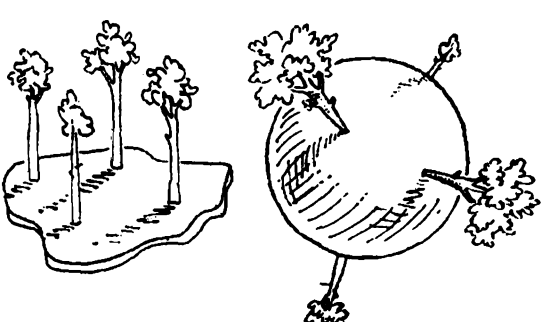
la distancia angular puede ser admitida como medida absoluta.

Si hacemos uso del movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, el cambio de la medida angular será visible, aunque insignificante. Si, por el contrario, desplazamos el punto de observación a cualquier estrella, como, por ejemplo, a Sirio, todas las medidas angulares cambiarán de tal manera, que las estrellas, alejadas unas de otras en nuestro cielo, pueden resultar próximas, y viceversa.

Lo absoluto resultó ser relativo

Frecuentemente decimos: arriba, abajo. ¿Son absolutos o relativos estos conceptos?

A esta pregunta las personas contestaban de muy diversa manera en diferentes épocas. Cuando los hombres no sabían aún nada sobre la esfericidad de la Tierra y se imaginaban a ésta plana, como una moneda, la dirección vertical se consideraba como concepto absoluto. Al mismo tiempo se suponía, que la dirección de la vertical era idéntica en todos los puntos de la superficie terrestre y que,



por lo tanto, era completamente natural hablar del "arriba" absoluto y del "abajo" absoluto.

Cuando se descubrió que la Tierra era esférica, la vertical se... tambaleó en el conocimiento de los hombres.

Efectivamente, al ser esférica la forma de la Tierra, la dirección de Za vertical depende, considerablemente, de la posición del punto de la superficie terrestre, a través del cual pasa la vertical.

Las direcciones de las verticales serán diferentes en los diversos puntos de la superficie terrestre. Y puesto que el concepto de arriba y abajo perdió su sentido al no indicar el punto de la superficie de la Tierra al que se refiere, entonces, el concepto absoluto se convirtió en relativo. En el Universo no existe ninguna dirección vertical única. Por esto, podemos señalar un punto de la superficie terrestre para cualquier dirección en el espacio para el que esta dirección resultará ser la vertical.

El "sentido común" protesta

Todo esto ahora nos parece evidente y no provoca duda alguna. Y, sin embargo, la historia testimonia que el comprender la relatividad del arriba y del abajo no fue tan fácil para la humanidad. Los hombres tienden a atribuir a los conceptos el significado de absoluto, si su relatividad no es evidente en la experiencia cotidiana (como en el caso de la "derecha" y la "izquierda").

Recordemos aquella objeción ridícula respecto a la esfericidad de la Tierra, que llegó hasta nosotros de la Edad Media: ¡¿cómo van a andar los hombres cabeza abajo?!

El error de este argumento estriba en que no se

reconoce la relatividad de la vertical, relatividad derivada de la esfericidad de la Tierra.

Y, claro está, si no se reconoce el principio de la relatividad de la vertical y se considera, por ejemplo, que la dirección de la vertical en Moscú es absoluta, es indudable que los habitantes de Nueva Zelandia andan cabeza abajo. Pero debemos recordar que, a su vez, nosotros, desde el punto de vista de los neozelandeses, también andamos cabeza abajo. Aquí no hay contradicción alguna, ya que, en realidad, la dirección vertical no es un concepto absoluto, sino relativo.

Hay que destacar, que empezamos a darnos cuenta del significado real de la relatividad de la vertical, tan sólo cuando examinamos dos puntos de la superficie terrestre bastante alejados entre sí, por ejemplo, Moscú y Nueva Zelandia. Si se examinan dos terrenos cercanos, por ejemplo, dos casas en Moscú, prácticamente puede suponerse que todas las direcciones verticales en éstas son paralelas, es decir, que la dirección vertical es absoluta.

Y solamente cuando se trata de terrenos comparables por sus dimensiones con la superficie de la Tierra, la tentativa de hacer uso de la vertical absoluta conduce al absurdo y a contradicciones.

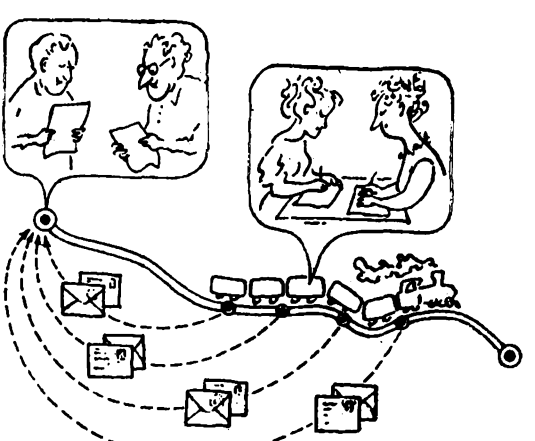
Los ejemplos examinados demuestran que muchos de los conceptos de los que hacemos uso son relativos, es decir, adquieren sentido solamente al indicar las condiciones en las que se efectúan las observaciones.

Capítulo segundo

EL ESPACIO ES RELATIVO

¿Un mismo sitio o no?

Frecuentemente decimos que dos acontecimientos ocurrieron en un mismo sitio, y nos acostumbramos de tal manera a ello, que tendemos a atribuir a nuestra afirmación un sentido absoluto. Y, sin embargo, ¡esta afirmación no vale nada! Esto es equivalente a decir: ahora son las cinco, sin indicar dónde precisamente son las cinco, en Moscú o en Chicago.



Para aclarar esto, supongamos que dos viajeras acordaron encontrarse cada día en un mismo sitio del vagón del rápido Moscú-Vladivostok y escribir cartas a sus maridos. Estos, sin embargo, no estarán de acuerdo con que sus esposas se encuentran en un mismo sitio del espacio. Por el contrario, los maridos tienen todos los motivos para afirmar que estos sitios distan unos de otros centenares de kilómetros, pues las cartas que recibían eran de Yaroslavl y Perm, Sverdlovsk y Tiumen, Omsk y Jabarovsk.

Por lo tanto, estos dos acontecimientos, es decir, la escritura de cartas en el primero y segundo día del viaje, desde el punto de vista de las viajeras, transcurrían en un mismo sitio, pero desde el punto de vista de sus maridos, estaban separados por centenares de kilómetros.

¿Quién lleva razón, las viajeras o sus maridos? Nosotros no podemos dar preferencia a ninguno de ellos. Vemos, evidentemente, que el concepto de "en un mismo sitio del espacio" tiene solamente sentido relativo.

Igualmente, la afirmación de que dos estrellas coinciden en la bóveda celeste, tiene sentido solamente, porque se señala que la observación se efectúa desde la Tierra. Se puede decir que dos acóntecimientos coinciden en el espacio, solamente cuando se señalan los cuerpos respecto a los cuales se determina la situación de estos acontecimientos.

De esta manera, el concepto de la situación en el espacio es también relativo. Cuando hablamos de la situación de los cuerpos en el espacio siempre suponemos la situación de unos cuerpos respecto a otros. Si se exige que a la pregunta de: ¿dónde se encuentra un cuerpo concreto?, se conteste sin mencionar otros cuerpos, debe reconocerse que semejante pregunta está privada de sentido.

¿Cómo se mueve en realidad un cuerpo?

De todo lo dicho anteriormente se deduce, que "el desplazamiento de un cuerpo en el espacio" es también un concepto relativo. Si decimos que un cuerpo se desplazó, esto significa simplemente que cambió su posición con respecto a otros cuerpos.

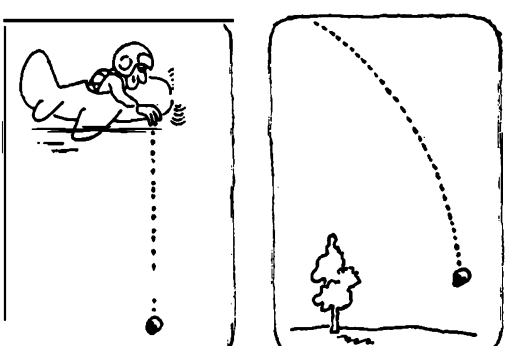
Si examinamos el movimiento de un cuerpo desde varios laboratorios que se desplazan unos respecto a los otros, este movimiento tendrá aspectos completamente diferentes.

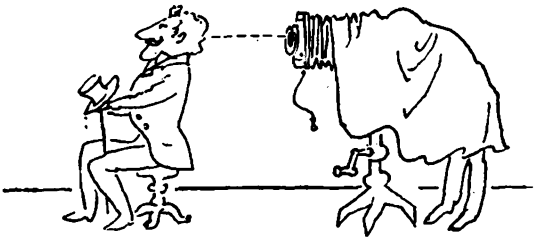
Un avión vuela. Desde éste se tira una piedra. La piedra cae en línea recta respecto al avión, pero respecto a la Tierra esta piedra describirá una curva denominada parábola.

Pero, ¿cómo se mueve la piedra en realidad?

Esta pregunta tiene tan poco sentido, como la pregunta de: ¿Bajo qué ángulo se ve la Luna en realidad? ¿Bajo el ángulo que se vería desde el Sol o bajo el ángulo que la vemos desde la Tierra?

La forma geométrica de la curva por la que se desplaza un cuerpo tiene un carácter tan relativo co-





mo la fotografía de un edificio. Igual que al fotografiar una casa por delante y por detrás obtendremos fotos diferentes, al observar el movimiento de un cuerpo desde diferentes laboratorios, obtendremos diferentes curvas de su movimiento.

¿Son equivalentes o no todos los puntos de observación?

Si nuestro interés, al observar el movimiento de un cuerpo, se limitase a estudiar la trayectoria (así se llama a la curva por la que se mueve el cuerpo), el problema de la elección del punto de observación se resolvería partiendo de las consideraciones sobre la comodidad y sencillez del cuadro a obtener.

Un buen fotógrafo, al elegir el sitio para fotografiar, se preocupa ante todo de la belleza del futuro cuadro, de la composición de éste.

Pero al estudiar el desplazamiento de los cuerpos en el espacio nos interesa algo más. Nosotros no sólo queremos conocer la trayectoria, sino que también queremos predecir cuál será la trayectoria por la que se moverá el cuerpo en condiciones concretas. Con otras palabras, queremos conocer las leyes que rigen el movimiento y que obligan al cuerpo a desplazarse así y no de otra manera.

Examinemos, desde este punto de vista, el pro-

blema sobre la relatividad del movimiento y aclararemos que no todas las posiciones en el espacio son equivalentes.

Si pedimos al fotógrafo hacernos una fotografía para el pasaporte es natural que queramos ser fotografiados de cara y no de espaldas. Este deseo determina el punto del espacio desde el que debe fotografiarnos el fotógrafo. Cualquier otra posición la consideraríamos no correspondiente a la condición planteada.

¡El reposo ha sido encontrado!

Las acciones externas influyen sobre el movimiento de los cuerpos. A estas acciones las llamamos fuerzas. El estudio de la influencia de estas acciones puede permitirnos enfocar el problema del movimiento de una manera completamente nueva.

Supongamos que disponemos de un cuerpo sobre el que no actúa fuerza alguna. Este cuerpo, según desde dónde lo examinemos, se moverá de una forma diferente más o menos arbitraria. Sin embargo, debe reconocerse que la posición más natural del observador será aquella desde la que el cuerpo resulte estar en reposo.

Ahora podemos, por lo tanto, dar una definición del reposo completamente nueva e independiente del desplazamiento del cuerpo dado respecto a otros cuerpos. Esta es: el cuerpo sobre el que no actúa fuerza externa alguna se encuentra en estado de reposo.

El laboratorio en reposo

¿Cómo realizar el estado de reposo? ¿Cuándo se puede estar seguro de que sobre un cuerpo no actúa fuerza alguna?

Para ello, evidentemente, es necesario alejar a nuestro cuer-

po de todos los demás que puedan actuar sobre él.

Con semejantes cuerpos en reposo podemos crear, aunque sea en la imaginación, un laboratorio completo y hablar entonces de las propiedades de los movimientos que se observan desde este laboratorio, que en lo sucesivo llamaremos en reposo.,

Si las propiedades del movimiento en cualquier otro laboratorio se diferencian de las propiedades del movimiento en el laboratorio en reposo, tendremos entonces el derecho completo de afirmar que el primer laboratorio se mueve.

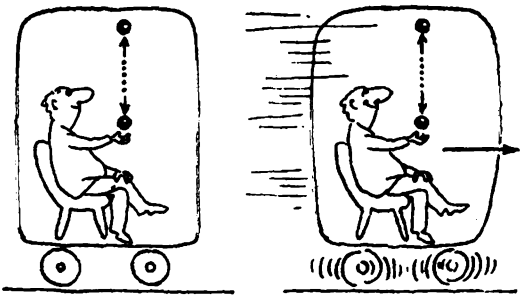
¿Se mueve o no el tren?

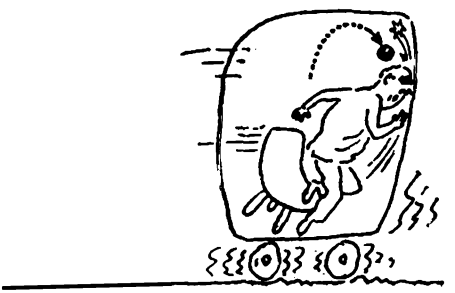
Una vez establecido que el movimiento en los laboratorios en movimiento transcurre de acuerdo a leyes diferentes de las del laboratorio en reposo, el concepto del movimiento parece haber perdido su carácter relativo: en lo sucesivo, al hablar de movimiento, debemos suponer solamente el movimiento de reposo relativo y llamarlo movimiento absoluto.

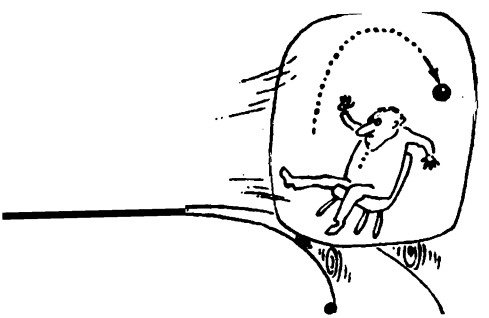
Pero, ¿observaremos o no durante cualquier desplazamiento del laboratorio desviaciones en éste de las leyes del movimiento de los cuerpos propias del laboratorio en reposo?

Sentémonos en un tren que marche con velocidad constante por una vía recta. Comencemos a observar el movimiento de los cuerpos en el vagón y a comparar esto con lo que sucede en un tren inmóvil.

La experiencia cotidiana nos sugiere que en semejante tren, que marcha rectilínea y uniformemente, no notaremos ningunas desviaciones, ningunas diferencias del movimiento con el tren inmóvil. Cada uno sabe que una pelotita tirada verticalmente hacia arriba en un vagón de un tren en marcha, caerá de nuevo







en nuestras manos y no describirá una curva semejante a la mostrada en la pág. 22. Si hacemos abstracción del sacudimiento, el cual es inevitable por razones técnicas, veremos que en el vagón que se mueve uniformemente sucede lo mismo que en el inmóvil.

Otra cosa es que el vagón disminuya o acelere su movimiento. En el primer caso experimentaremos una sacudida hacia adelante, y en el segundo, hacia atrás, y notaremos claramente la diferencia respecto al reposo.

Si el vagón, al moverse uniformemente, cambia la dirección del movimiento, tambien sentiremos lo siguiente: en las curvas cerradas a la derecha seremos empujados al lado izquierdo del vagón, y en las curvas a la izquierda seremos empujados a la derecha.

Resumiendo estas observaciones llegamos a la siguiente conclusión: mientras que cualquier laboratorio se desplace rectilínea y uniformemente, respecto al laboratorio en reposo, en él no será posible descubrir desviaciones del comportamiento de los cuerpos en el laboratorio en reposo. Pero en cuanto la velocidad del laboratorio en movimiento cambie de magnitud (aceleración o retardación) o de dirección (curva), se notará inmediatamente en el comportamiento de los cuerpos que se encuentran en él.

El reposo se ha perdido definitivamente

La propiedad asombrosa del movimiento rectilíneo y uniforme del laboratorio, de no influir en la conducta de los cuerpos que se encuentran en él, nos obliga revisar el concepto de reposo. Resulta que el estado de reposo y el estado de movimiento rectilíneo y uniforme no difieren en nada uno del otro. El laboratorio que se mueve rectilínea y uniformemente, respecto al laboratorio en reposo,

puede ser considerado también laboratorio en reposo. Esto significa que no existe un reposo absoluto, sino una infinidad de "reposos" diversos. Existe no sólo un laboratorio "en reposo", sino una cantidad innumerable de laboratorios "en reposo" que se desplazan, unos respecto a los otros, rectilínea y uniformemente a diferentes velocidades.

Y por cuanto el reposo resulta ser relativo, y no absoluto, es menester indicar siempre respecto a cuál de los innumerables laboratorios que se desplazan rectilínea y uniformemente, uno respecto al otro, observamos el movimiento.

Como se ve, no logramos convertir el concepto de movimiento en concepto absoluto.

Siempre queda abierta la pregunta: ¿respecto a qué "reposo" observamos el movimiento?

De esta manera llegamos a la ley más importante de la naturaleza, que generalmente se llama: Principio de la Relatividad del Movimiento.

Esta ley dice: el- movimiento de los cuerpos en todos 10s laboratorios que se desplazan unos respecto a los otros de manera rectilínea uniforme transcurre de acuerdo a unas mismas leyes.

La ley de la inercia

Del principio de la relatividad del movimiento se deduce que el cuerpo Sobre el que no actúa ninguna fuerza puede encontrarse tanto en estado de reposo, como en estado de movimiento rectilíneo y uniforme. En la física, a semejante fenómeno se le llama ley de la inercia.

Sin embargo, esta ley parece estar oculta y no se manifiesta directamente en la vida ordinaria. Según la ley de la inercia, el cuerpo que se encuentra en estado de .movimiento rectilíneo y uniforme debe pro-

seguir su movimiento indefinidamente, mientras no actúen sobre él fuerzas externas. Sin embargo, sabemos por nuestras observaciones, que los cuerpos a los que no se aplican fuerzas se paran.

La clave consiste en que sobre todos los cuerpos accionan fuerzas externas: las fuerzas del rozamiento. Y por esto, no se cumple la condición necesaria para poder observar la ley de la inercia, es decir, la ausencia de fuerzas externas que actúen sobre el cuerpo. Pero, mejorando las condiciones del experimento, disminuyendo las fuerzas de rozamiento, podemos aproximarnos a las condiciones ideales, imprescindibles para poder observar la ley de la inercia y demostrar, de esta forma, la justeza de esta ley en los movimientos que observamos en la vida cotidiana.

El descubrimiento del principio de la relatividad del movimiento es uno de los más grandes. Sin él hubiese sido imposible el desarrollo de la Física. Y este descubrimiento se lo debemos a Galileo Galilei, quien se pronunció valientemente contra la teoría de Aristóteles, reinante en aquel entonces y apoyada por la iglesia catolica, y de acuerdo a la cual, el movimiento es posible solamente si existe una fuerza, y sin ella debe interrumpirse inevitablemente. Galileo demostró, con una serie de brillantes experimentos, que la causa por la que se paran los cuerpos en movimiento, por el contrario, es la fuerza del rozamiento y que, si no existiese esta fuerza, el cuerpo, puesto una vez en movimiento, se movería eternamente.

¡La velocidad es también relativa!

Del principio de la relatividad del movimiento se deduce, que hablar del movimiento rectilíneo y uniforme de un cuerpo con alguna velocidad, sin indicar el laboratorio en reposo res-

pecto al cual se ha medido esta velocidad, tiene tan poco sentido como hablar de la longitud geográfica sin haber quedado previamente de acuerdo, sobre el meridiano desde el que se efectúa la medida.

La velocidad resulta ser también un concepto relativo. Al determinar la velocidad de un mismo cuerpo, respecto a diferentes laboratorios en reposo, obtendremos resultados diferentes. Pero, al mismo tiempo, cualquier cambio de la velocidad,. sea aceleración, retardación o cambio de dirección, tiene sentido absoluto y no depende del laboratorio en reposo desde el que observamos el movimiento.

Capítulo tercero

LA TRAGEDIA DE LA LUZ

La luz no se propaga instantáneamente

Hasta aquí nos hemos convencido de la existencia del principio de la relatividad del movimiento, de la existencia de una infinidad de laboratorios "en reposo". En estos últimos, las leyes del movimiento de los cuerpos no se diferencian entre sí. Sin embargo, existe un género de movimiento que a primera vista contradice al principio antes establecido. Este movimiento es la propagación de la luz.

La luz no se propaga instantáneamente, aunque sí con una velocidad enorme: ¡300 000 kilómetros por segundo!

Es difícil concebir tan colosal velocidad, ya que en la vida cotidiana nos encontramos con velocidades inconmensurablemente menores. Por ejemplo, incluso la velocidad del cohete cósmico soviético alcanza solamente 12 kilómetros por segundo. De todos los cuerpos con los que estamos acostumbrados a tratar, el más veloz es la Tierra, en su movimiento de traslación alrededor del Sol. Pero, incluso esta velocidad es solamente de 30 kilómetros por segundo.

¿Se puede cambiar la velocidad de la luz?

Aunque la enorme velocidad con que se propaga la luz es algo sorprendente, lo es más aún el hecho de que esta velocidad se distinga por una severa uniformidad.

El movimiento de cualquier cuerpo siempre puede ser disminuido o acelerado artificialmente. Incluso el de una bala. Pongamos un cajón con arena en la trayectoria de una bala. Después de atravesar el cajón, la bala perderá parte de su velocidad y proseguirá más lentamente.

Con la luz ocurre algo completamente diferente. Si la velocidad de la bala depende del tipo de fusil y de las propiedades de la pólvora, en cambio, la velocidad de la luz es igual cualquiera que sea la fuente que la origine.

Pongamos una placa de cristal en la trayectoria de la luz. Pasando por la placa, la velocidad de la luz disminuirá, puesto que en el cristal la velocidad es menor que en el vacío. Sin embargo, al salir de la placa la luz seguirá propagándose de nuevo ¡con la velocidad de 300 000 kilómetros por segundo!

La propagación de la luz en el vacío, a diferencia de todos los demás movimientos, posee la propiedad importantísima de no poder ser disminuida ni acelerada. Cualesquiera que sean los cambios que sufra un rayo de luz en una substancia, al volver al vacío se propaga con la velocidad anterior.

La luz y el sonido

En este aspecto, la propagación de la luz se parece a la propagación del sonido, y no al movimiento de los cuerpos normales. El sonido es el movimiento oscilatorio del ambiente en que

se propaga. Por esto, su velocidad está determinada por las propiedades del ambiente y no por las propiedades del cuerpo sonoro: la velocidad del sonido, como la de la luz, no puede ser disminuida ni aumentada, incluso si se hace pasar el sonido a través de un cuerpo cualquiera.

Si, por ejemplo, interponemos un tabique de metal en el camino de propagación del sonido, después de haber cambiado su velocidad dentro del tabique, el sonido recobrará su velocidad anterior en cuanto vuelva de nuevo al medio inicial.

Coloquemos dentro de la campana de una bomba de aire una bombilla eléctrica y un timbre eléctrico y comencemos a extraer el aire. El sonido del timbre se debilitará hasta hacerse imperceptible, pero la bombilla seguirá iluminando como antes.

Este experimento demuestra que el sonido se propaga solamente en ambiente material mientras que la luz puede propagarse también en el vacío.

En esto consiste la diferencia esencial entre ambos.

El principio de la relatividad del movimiento parece ser quebrantado

La colosal velocidad de la luz en el vacío, aunque no infinita, condujo a un conflicto con el principio de la relatividad del movimiento.

Imaginémonos un tren que marcha a la enorme velocidad de 240 000 kilómetros por segundo. Supongamos que nos encontramos en la cabeza del tren y que en la cola de éste se enciende una bombilla. Reflexionemos cuáles pueden ser los resultados de **la** medición del tiempo, requerido por la luz, para llegar desde un extremo del tren al otro.

Puede parecer que este tiempo se diferenciará del que se obtenga en un tren en reposo. En realidad,

respecto al tren que marcha a una velocidad de 240 000 kilómetros por segundo, la luz debería tener una velocidad de 300 000-240 000=60 000 kilómetros por segundo (en dirección del movimiento del tren). La luz parece alcanzar la pared delantera del vagón de cabeza del tren que huye de ella. Si colocamos la bombilla en la cabeza del tren y medimos el tiempo requerido por la luz para llegar hasta el último vagón, puede parecer que la velocidad de ésta, en dirección contratia al movimiento del tren, debería ser de 240 000+ +300 000=540 000 kilómetros por segundo. (La luz y el vagón de cola van al encuentro uno de otro).

Resulta ser, que en el tren en marcha la luz debería propagarse a diferentes velocidades en las dos diferentes direcciones, mientras que en el tren en reposo esta velocidad debería ser igual en ambas direcciones.

En lo que se refiere a la bala, la cosa es completamente distinta. Si disparamos en dirección del movimiento del tren o al encuentro de éste, la velocidad de la bala, respecto a las paredes del tren, será siempre la misma e igual a la velocidad de la bala en el tren inmóvil.

El asunto consiste en que la velocidad de la bala depende de la velocidad a la que se mueva el fusil. La velocidad de la luz, como ya dijimos, no cambia con los cambios de velocidad del desplazamiento de la bombilla.

Nuestro razonamiento parece demostrar con evidencia, que la propagación de la luz se encuentra en brusca contradicción con el principio de la relatividad del movimiento. Mientras que la bala, tanto en el tren en reposo, como en el tren en movimiento, se mueve a una misma velocidad respecto a las paredes del vagón, la luz en el tren, que marcha a una velocidad de 240 000 kilómetros por segundo, debería

propagarse, por lo visto, en una dirección a una velocidad de cinco veces menor y, en la otra, a una velocidad de 1,8 veces más rápida que en el tren en reposo.

El estudio de la propagación de la luz, al parecer, debería crear la posibilidad, para establecer la velocidad absoluta del movimiento del tren.

Surge la esperanza: ¿se podrá o no establecer el concepto de reposo absoluto empleando el fenómeno de la propagación de la luz?

El laboratorio en el que la luz se propaga en todas direcciones a una misma velocidad de 300 000 kilómetros por segundo, puede ser llamado de reposo absoluto. En cualquier otro laboratorio, que se mueva respecto al primero rectilínea y uniformemente,. la velocidad de la luz deberá ser diferente en diferentes direcciones. En este caso, no existe ni la relatividad del movimiento, ni la relatividad de la velocidad, ni la del reposo, establecidas anteriormente.

"El éter mundial"

¿Cómo entender semejante situación? En su tiempo, empleando la analogía entre los fenómenos de la propagación de la luz y del sonido, los físicos introdujeron un medio especial llamado "éter", en el que la luz se propagaba de la misma manera que el sonido en el aire. Se suponía entonces, que todos los cuerpos, al moverse en el éter, no "atraían" a éste consigo, como no "atrae" al agua una red hecha de mimbre fino.

Si nuestro tren es inmóvil respecto al éter la luz se propagará a una misma velocidad en todas las direcciones. El movimiento del tren respecto al éter se revelará inmediatamente en que la velocidad de propagación de la luz resultará ser diferente para las diferentes direcciones.

Sin embargo, la introducción del éter-ambiente, cuyas vibraciones se manifiestan en forma de luz, provoca una serie de preguntas. En primer término, la propia hipótesis tiene un carácter artificial bastante acentuado. En efecto, las propiedades del aire pueden ser estudiadas no sólo al observar la propagación del sonido en él, sino también por los más diversos métodos físicos y químicos de investigación. Entre tanto, el éter, de una manera misteriosa, no participaba en la mayoría de los fenómenos. La densidad y la presión del aire son accesibles a las mediciones poco precisas. Sin embargo, todas las tentativas de llegar a saber algo sobre la densidad y presión del éter no condujeron absolutamente a nada,

Se creó una situación bastante absurda.

Claro, cualquier fenómeno de la naturaleza puede "explicarse" introduciendo un líquido especial que posea las propiedades requeridas. Pero, la teoría legítima de un fenómeno se diferencia del simple relato

de los hechos conocidos con palabras científicas, precisamente en que de ésta se deduce muchísimo más de lo que proporcionan los mismos hechos en los que se basa esta teoría. Por ejemplo, el concepto de átomo penetró ampliamente en la ciencia vinculado a los problemas químicos, sin embargo, la noción sobre los átomos creó la posibilidad de explicar y predecir una infinidad de fenómenos no relacionados con la química.

La idea sobre el éter puede ser comparada con la explicación que daría un salvaje de funcionamiento del gramófono, suponiendo que en el cajón misterioso se encierra un "espíritu gramofónico" especial. Por supuesto, semejantese "explicaciones" no explican absolutamente nada.

Los físicos, antes del éter, ya tenían en este sentido una amarga experiencia: en su tiempo, el fenómeno de la combustión lo "explicaban" por las propiedades de un líquido especial, llamado flogisto, y los fenómenos térmicos los explicaban por las propiedades de otro líquido llamado calórico. Por cierto, ambos líquidos, igual que el éter, se caracterizaban por una imperceptibilidad absoluta.

Se crea una situación difícil

Pero lo más fmportante es que el quebranto, ocasionado por la luz, del principio de la relatividad del movimiento debería conducir, ineludiblemente, al quebrantamiento del principio de la relatividad del movimiento por todos los demás cuerpos.

En efecto, cualquier ambiente presente resistencia al movimiento de los cuerpos. Y, por lo tanto, el desplazamiento de los cuerpos en el éter debería estar también relacionado con el rozamiento. El movimiento

de un cuerpo debería ir disminuyendo hasta convertirse, por fin, en estado de reposo. Sin embargo, la Tierra ya hace muchos miles de millones de años (de acuerdo con los datos geológicos) que gira alrededor del Sol y no se notan indicios de que vaya frenándose por el rozamiento.

De esta manera, habiendo querido explicar el comportamiento extraño de la luz en el tren en movimiento con la existencia del éter, entramos en un callejón sin salida. El concepto del éter no elimina las contradicciones entre el quebranto del principio de la relatividad provocado por la luz y el cumplimiento de este principio por todos los movimientos restantes.

El exprimento debe resolver

¿Qué hacer con semejante contradicción? Antes de exponer estas o aquellas consideraciones al respecto, prestemos atención a la siguiente circunstancia.

La contradicción entre la propagación de la luz y el principio de la relatividad del movimiento fue deducida exclusivamente de los razonamientos.

Es verdad, repetimos, que estos razonamientos eran muy persuasivos. Pero limitándonos solamente a razonar nos pareceríamos a algunos filósofos antiguos, que se esforzaban por obtener las leyes de la naturaleza de su propia cabeza. E inevitablemente surge el peligro de que el mundo construido de tal manera, aunque tenga muchas buenas cualidades, sea muy poco parecido al mundo real.

El juez supremo de cualquier teoría física es el experimento. Y por esto, sin limitarnos a razonar solamente sobre cómo debe propagarse la luz en un tren en marcha, debemos dirigirnos a los experimentos

que nos mostrarán cómo en realidad se propaga la luz en estas condiciones.

La realización de semejante experimento se facilita por el hecho de que nosotros mismos vivimos en un cuerpo que se mueve sin duda alguna. La Tierra, al moverse alrededor del Sol, no realiza movimiento rectilíneo alguno y, por lo tanto, no puede estar en reposo constante desde el punto de vista de cualquier laboratorio en reposo.

Incluso si cogemos como punto de partida un laboratorio, respecto al cual la Tierra en el mes de enero esté en reposo, resultará que éste seguramente se encontrará ya en movimiento en julio, puesto que la dirección del movimiento de la Tierra alrededor de Sol cambia. Por esto, al estudiar la propagación de la luz en la Tierra, prácticamente lo hacemos en un laboratorio móvil que, además en nuestras condiciones, posee una velocidad bastante importante, de 30 kilómetros por segundo. (Se puede prescindir del movimiento de rotación de la Tierra que origina velocidades de hasta medio kilómetro por segundo.)

Pero, puesto que el tren se desplaza rectilíneamente y la Tierra, por el contrario, en circunferencia, ¿tenemos o no derecho a comparar el globo terrestre con el tren en marcha que citábamos anteriormente y que nos condujo a un callejón sin salida? Sí, tenemos derecho. Es completamente pérmisible el considerar que, en la ínfima parte de segundo requerida por la luz para pasar a través de todos los instrumentos del laboratorio, la Tierra se mueve rectilínea y uniformemente. El error que se comete al hacer esto es tan insignificante que no puede detectarse.

Pero, ya que comparamos el tren con la Tierra, es natural que esperemos que en ésta, al igual que en nuestro tren, la luz se comporte con la misma extra-

ñeza: se propague a velocidades diferentes en direcciones también diferentes.

El principio de la relatividad triunfa

Semejante experimento fue efectuado en 1881 por Michelson, uno de los experimentadores más grandes del siglo pasado, que midió con gran exactitud la velocidad de la luz en diferentes direcciones respecto a la Tierra. Para lograr percibir la esperada y pequeña diferencia entre las velocidades, Michelson tuvo que hacer uso de la técnica experimental mas delicada y dar muestra de gran ingeniosidad. La precisión del experimento fue tan elevada, que se hubiera podido revelar una diferencia mucho menor de las velocidades que la esperada.

El experimento de Michelson, que desde entonces se ha repetido reiteradamente en diferentes condiciones, condujo a un resultado completamente inesperado. La propagación de la luz en el laboratorio móvil resultó ser, en realidad, completamente diferente a la esperada por nuestros razonamientos. Precisamente Michelson descubrió que, en la Tierra en movimiento, la luz se propaga en todas direcciones a una velocidad, completamente idéntica. En este sentido, la propagación de la luz transcurre de una forma idéntica al vuelo de la bala, independientemente del movimiento del laboratorio y a igual velocidad respecto a sus paredes en todas las direcciones.

De esta manera, el experimento de Michelson demostró que el fenómeno de la propagación de la luz, en contrariedad a nuestros razonamientos, no contradice el principio de la relatividad del movimiento y, por el contrario, está completamente de acuerdo con este. Con otras palabras: nuestros razonamientos en la pág. 30 resultaron ser erróneos.

Salir de las llamas y caer en las brasas

Así pues, el experimento nos liberó de la penosa contradicción entre las leyes de la propagación de la luz y el principio de la relatividad del movimiento. La contradicción resultó ser aparente y debida, por lo visto, a lo erróneo de nuestros razonamientos. Pero, ¿en qué estriba, sin embargo, este error?

Durante casi un cuarto de siglo, desde 1881 hasta 1905, los físicos de todo el mundo se rompían la cabeza con esta pregunta, pero todas las explicaciones conducían inevitablemente a nuevas contradicciones entre la teoría y ,el experimento.

Si la fuente del sonido y el observador se desplazan en una jaula móvil hecha de mimbre, el observador sentirá un fuerte viento. Si se mide la velocidad del sonido respecto a la jaula, resultará que en dirección del movimiento esta velocidad será menor que en dirección opuesta. Sin embargo, si instalamos la fuente del sonido en un vagón con las puertas y ventanas cerradas, y medimos la velocidad del sonido en él, veremos que ésta es igual en todas las direcciones, puesto que el aire es "arrastrado" junto con el vagón.

Pasando del sonido a la luz, se podríá hacer la siguiente suposición para explicar los resultados del experimento de Michelson: la Tierra, al desplazarse en el espacio, no deja inmóvil al éter. cuando pasa a través de él, como sucedería con la jaula de mimbre. Al contrario, supongamos que la Tierra arrastra consigo al éter y forma en su movimiento un todo con él. Entonces, el resultado del experimento de Michelson sería absolutamente comprensible.

Pero esta suposición está en brusca contradicción con una numerosa cantidad de otros experimentos, por ejemplo, con la propagación de la luz en un tubo

por el que corre el agua. Si la suposición sobre el arrastre del éter fuese correcta, entonces, al medir la velocidad de la luz en la dirección en que corre el agua, obtendríamos una velocidad igual a la suma de la velocidad de la luz en el agua tranquila, más la velocidad del agua corriente. Sin embargo, la medición directa da una velocidad inferior a la que se deduce de este razonamiento.

Ya hemos hablado de la situación sumamente extraña en la que los cuerpos que atraviesan el éter no experimentan rozamiento considerable. Pero, si no sólo atraviesan el éter, sino que, además, lo arrastran consigo, el rozamiento, lógicamente: debe ser grande.

Como se ve, todas las tentativas para eludir la contradicción creada por los inesperados resultados del experimento de Michelson resultaron infructuosas.

Resumamos.

El experimento de Michelson confirma el principio de la relatividad tanto para el movimiento de los cuerpos normales, como para el fenómeno de propagación de la luz, es decir, para todos los fenómenos de la naturaleza.

Como vimos anteriormente, del principio de la relatividad del movimiento se deduce directamente la relatividad de las velocidades: los valores de la velocidad deben ser diferentes para diferentes laboratorios que se desplazan unos respecto a otros. Pero, por otra parte, la velocidad de la luz, de 300 000 kilómetros por segundo, es idéntica en diferentes laboratorios, Por consiguiente, esta velocidad no es relativa, sino absoluta.

Capítulo cuarto

EL TIEMPO RESULTA SER RELATIVO

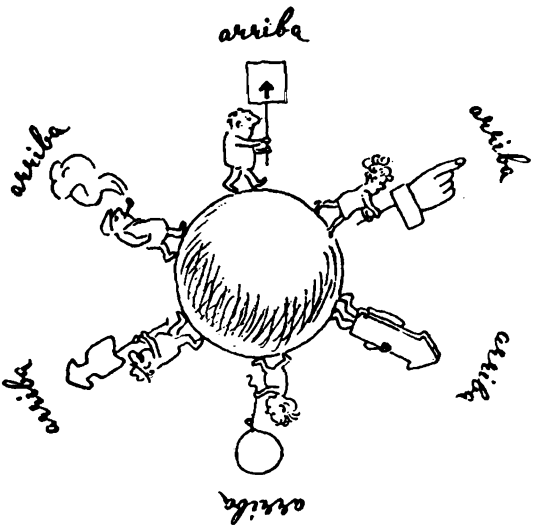
¿Existe en realidad contradicción o no existe?

A primera vista puede parecer que se trata de una contradicción lógica. La constancia de la velocidad de la luz en direcciones diferentes confirma el principio de la relatividad y, al mismo tiempo, la velocidad de la luz es absoluta.

Recordemos, sin embargo, la actitud del hombre de la Edad Media ante la realidad de la esfericidad de la Tierra: para aquél, la forma esférica de la Tierra estaba en brusca contradicción con la existencia de la fuerza de la gravedad, ya que todos los cuerpos deberían rodar de la Tierra hacia "abajo". Y, a pesar de esto, nosotros sabemos con certeza, que aquí no existe ninguna contradicción lógica. Simplemente, los conceptos de arriba y abajo son relativos y no absolutos.

La misma situación tiene lugar en la cuestión sobre la propagación de la luz.

Sería en vano buscar la contradicción lógica entre el principio de la relatividad del movimiento y lo absoluto de la velocidad de la luz. La contradicción se manifiesta aquí solamente porque, desapercibidamente para nosotros, hemos introducido otras suposi-



ciones, al igual que los hombres de la Edad Media, al negar la esfericidad de la Tierra, suponían absolutos los conceptos de arriba y abajo. Esta convicción de lo absoluto del arriba y del abajo, tan ridícula para nosotros, surgió como resultado de su experiencia limitada: en aquel entonces los hombres viajaban poco y conocían solamente algunos sectores pequeños de la superficie terrestre. Por lo visto, algo semejante nos ocurrió a nosotros, y, por limitada que es nuestra experiencia, tomamos algo relativo por absoluto. Pero ¿qué precisamente?

Para poder descubrir nuestro error, en lo sucesivo nos basaremos solamente en las posiciones establecidas por el experimento.

Nos sentamos en el tren

Imaginémonos un tren de 5 400 000 kilómetros de longitud, que marcha rectilínea y uniformemente a una velocidad de 240 000 kilómetros por segundo.

Supongamos que, en algún momento, en el centro del tren se enciende una bombilla. En el primero y último vagones van instaladas unas puertas automáticas que se abrirán en el momento en que la luz incida sobre ellas. ¿Qué verá la gente que va en tren y qué verá la gente que se encuentra en el andén?

Para contestar a esta pregunta, como ya hemos convenido, nos atendremos solamente a los factores experimentales.

La gente que va sentada en los vagones del centro del tren verá lo siguiente. Ya que de acuerdo al experimento de Michelson, la luz se propaga respecto al tren a igual velocidad en todas las direcciones, es decir, a 300 000 kilómetros por segundo, pasados nueve segundos (2 700 000 : 300 000) la luz alcanzará simultáneamente el primero y último vagones y ambas puertas se abrirán a un mismo tiempo.

¿Qué es lo que verá la gente en el andén? Respecto a este andén, la luz también se propaga a una velocidad de 300 000 kilómetros por segundo. Pero el último vagón marcha al encuentro del rayo de luz. Por esto, la luz se encontrará con el último vagón dentro de $\frac{2\,700\,000}{300\,000+240\,000}=5$ segundos. El rayo de luz, por el contrario, debe alcanzar al vagón delantero y, por lo tanto, se encontrará con éste solamente transcurridos $\frac{2\,700\,000}{300\,000-240\,000}=45$ segundos.

Así pues, a la gente del andén le parecerá que las puertas del tren no se abren simultáneamente. Primero

se abrirá la puerta de atrás v solamente pasados 45-5=40 segundos se abrirá la puerta de delante*.

De esta manera, dos acontecimientos completamente similares, la apertura de las puertas de delante y de atrás, resultaron ser simultáneos para la gente del tren, y estar separados por un intervalo de 40 segundos para la gente del andén.

El "sentido común" queda en ridículo

¿Habrá contradicción en esto o no? ¿No será este hecho un absurdo completo parecido a lo de: "La longitud de cocodrilo desde la cola hasta la cabeza es de dos metros, y desde la cabeza hasta la cola es de un metro?"

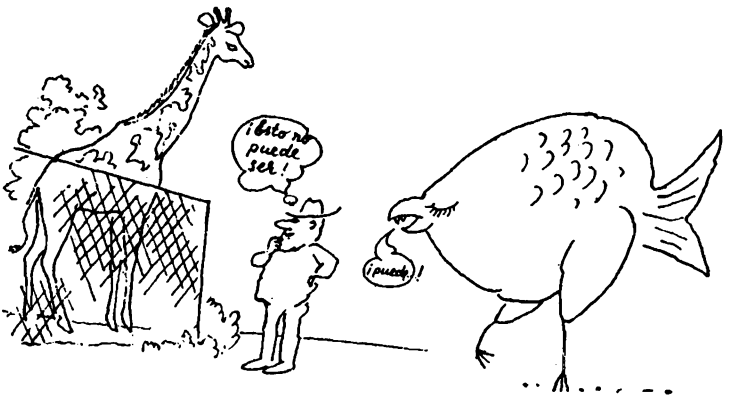
Pensemos por qué el resultado obtenido parece tan absurdo, a pesar de encontrarse en completa conformidad con los datos experimentales.

Pero por mucho que pensemos, no lograremos encontrar una contradicción lógica de que dos fenómenos que transcurren simultáneamente para la gente del tren, resultan estar separados por un intervalo de 40 segundos para la gente del andén.

Lo único que podemos decir para consolarnos es que nuestras deducciones están en contradicción con "el sentido común".

¡Pero recordemos cómo el "sentido común" del hombre del medievo se resistía a la realidad del movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol! Es que, en realidad, toda la experiencia cotidiana indicaba al hombre de la Edad Media, con seguridad indiscutible, que la Tierra estaba parada y que era el Sol el que se movía alrededor de ésta. ¡¿Y acaso

*** Más adelante se ampliarán estos razonamientos. (Véanse las págs. 63 y 64).**



no es al "sentido común" al que los hombres deben la ridícula afirmación, sobre la imposibilidad de que la forma de la Tierra sea esférica?!

El choque entre el "sentido común" y los hechos reales se ridiculiza en la conocida anécdota sobre el granjero que, al ver a la jirafa en el parque zoológico, exclamó: "¡Esto no puede ser!"

El llamado sentido común no es nada más que la simple generalización de nuestras ideas y costumbres formadas en la vida cotidiana. Esto es un nivel determinado de la comprensión,. que refleja el nivel del experimento.

Toda la dificultad para entender y comprender que en el andén no nos parezcan simultáneos dos acontecimientos que transcurren al mismo tiempo en el tren, es semejante a la dificultad del granjero que quedó perplejo ante el aspecto de la jirafa. Lo mismo que el granjero no había visto nunca antes a ese tipo de animal, nosotros jamás nos movimos a una velocidad que incluso se aproxime a la fantástica velocidad de 240 000 kilómetros por segundo. Y tampoco es nada sorprendente que, cuando los físicos se encuentran

con velocidades tan fabulosas, observen hechos muy diferentes a los que estamos acostumbrados en la vida cotidiana.

El inesperado resultado del experimento de Michelson, que situó a los físicos ante estos nuevos hechos, obligó a revisar, incluso a pesar del "sentido común", conceptos, al parecer, tan evidentes y habituales como la simultaneidad de los acontecimientos.

Claro está que, permaneciendo en el terreno del "sentido común", se podría negar la existencia de los nuevos fenómenos, pero, actuando de tal manera, nos asemejaríamos al granjero de la anécdota.

El tiempo tiene la misma suerte que el espacio

La ciencia no tiene miedo de chocar con el llamado sentido común. Lo único que la atemoriza es la discrepancia de los conceptos existentes con los datos nuevos del experimento, y, si esta discrepancia tiene lugar, la ciencia rompe despiadadamente los conceptos formados, elevando nuestros conocimientos a un grado superior.

Nosotros creíamos que dos acontecimientos simultáneos lo seguirían siendo' en cualquier laboratorio. El experimento nos condujo a otra deducción. Quedó claro que esto es justo solamente en caso de que los laboratorios estén en reposo uno respecto al otro. Si, por el contrario, ambos laboratorios se mueven uno respecto al otro, los acontecimientos, que son simultáneos en uno de ellos, deben ser reconocidos no simultáneos en el otro. El concepto de simultaneidad se Convierte en concepto relativo, y solamente tiene sentido al indicar cómo se mueve el laboratorio donde se observan estos acontecimientos.

Recordemos el ejemplo de la relatividad de las magnitudes angulares sobre el que hablamos en la

pág. 12. ¿Qué ocurre allí? Supongamos que la distancia angular entre dos estrellas, al observarlas desde la Tierra, resulte igual a cero por enconstrarse ambas en una línea recta común. En nuestra vida cotidiana jamás tendremos contradicción alguna creyendo que esta afirmación es absoluta. Es diferente si se abandonan los límites del sistema solar y se observan estas mismas estrellas desde cualquier otro punto del espacio. La dimensión angular en este caso resultará diferente de cero.

El hecho tan evidente para el hombre contemporáneo, de que dos estrellas que coinciden al ser observadas desde la Tierra, pueden no coincidir al observarlas desde otros puntos del espacio, le parecería absurdo al hombre de la Edad Media, que se imaginaba al cielo como una cúpula cubierta de estrellas.

Supongamos que se nos pregunta: ¿pero, en realidad, abstrayéndonos de toda clase de laboratorios, son simultáneos dos acontecimientos o no? Por desgracia, esta pregunta no tiene más sentido que la siguiente: ¿pero, en realidad, abstrayéndonos de los puntos desde los que se efectúa la observación, se encuentran o no dos estrellas en una misma línea recta? La cosa está en que, al igual que el problema de las estrellas, que se encuentran 0 no en una misma línea recta, va ligado no sólo a la situación de las estrellas, sino también al punto desde el que éstas se observan; la simultaneidad va vinculada no sólo a los dos acontecimientos, sino también al laboratorio desde el que se efectúa la observación de los mismos.

Mientras tuvimos que ver con velocidades pequeñas, en comparación con la velocidad de la luz, no pudimos descubrir la relatividad del concepto de simultaneidad. Y, solamente, al estudiar movimientos de velocidades comparables con la de la luz, nos vimos obligados a revisar el concepto de simultaneidad.

De manera análoga, los hombres se vieron obligados a revisar los conceptos de arriba y abajo, cuando comenzaron a viajar a distancias comparables con las dimensiones de la Tierra. Hasta entonces, la noción que se tenía sobre la Tierra plana, claro está, no podía conducir a ninguna contradicción con el experimento.

Es verdad que nosotros no tenemos posibilidades para desplazarnos a velocidades próximas a la de la luz y observar con nuestra propia experiencia los hechos paradójicos, desde el punto de vista de las viejas nociones, sobre los que acabamos de referirnos. Pero, gracias a la técnica experimental contemporánea, podemos detectar estos hechos con autenticidad completa en una serie de fenómenos físicos.

¡Así pues, al tiempo le tocó la misma suerte que al espacio! Las palabras "a un mismo tiempo" resultaron tener tan poco significado como "en un mismo sitio".

El intervalo entre dos acontecimientos, igual que la distancia espacial entre ellos, exige que se indique el laboratorio respecto al cual se hace esta afirmación.

La ciencia triunfa

El descubrimiento del hecho de la relatividad del tiempo significa en sí una evolución profunda en las opiniones del hombre respecto a la naturaleza. Esta es una de las victorias más grandes del pensamiento humano sobre la rutina de las ideas formadas durante siglos, y solamente puede ser comparada con la revolución en las nociones humanas, relacionada con el descubrimiento de la esfericidad de la Tierra.

El descubrimiento de la relatividad del tiempo fue hecho en 1905, por el físico más grande del siglo XX, Albert Einstein (1880-1955). Este descubrimiento

situó al joven de 25 años, Albert Einstein, en las filas de los titanes del pensamiento humano. En la historia se situó junto a Copérnico y Newton como trazador de nuevos caminos en la ciencia.

V. I. Lenin llamó a Albert Einstein uno de los "grandes transformadores de la ciencia natural".

La ciencia sobre la relatividad del tiempo y las consecuencias que de ésta se deducen, generalmente, se llaman Teoría de la Relatividad.. Esta no debe confundirse con el Principio de la Relatividad del Movimiento.

La velocidad tiene límite

Antes de la segunda guerra mundial los aviones volaban a velocidades inferiores a la del sonido y, en cambio, ahora ya se construyen aviones "supersónicos". Las ondas de radio se propagan a la velocidad de la luz. Pero, ¿no sería posible plantearse el problema de crear un telégrafo "superluminoso" para poder transmitir señales a una velocidad superior a la de la luz? Esto resulta ser imposible.

Indudablemente, si se pudiese efectuar la transmisión de señales a velocidad infinita, entonces tendríamos la posibilidad de establecer de manera equivalente la simultaneidad de dos acontecimientos. Si la señal a una velocidad ilimitada sobre el primer acontecimiento llegase simultáneamente con la señal del segundo, entonces diríamos que estos dos acontecimientos transcurrieron simultáneamente. De esta forma, la simultaneidad obtendría un carácter absoluto, independiente del movimiento del laboratorio respecto al cual se hace esta afirmación.

Pero, como lo absoluto del tiempo se refuta con el experimento, llegamos a la conclusión de que la trans-

misión de señales no puede ser instantánea. La velocidad de transmisión de señales de un punto del espacio a otro no puede ser infinita o, con otras palabras, no puede superar la magnitud límite, denominada velocidad máxima.

Esta velocidad máxima coincide con la velocidad de la luz.

En realidad, de acuerdo con el principio de la relatividad del movimiento, las leyes de la naturaleza deben ser iguales en todos los laboratorios que se muevan unos respecto a los otros rectilínea y uniformemente. La afirmación de que ninguna velocidad puede superar el límite establecido es también una ley de la naturaleza y, por lo tanto, la magnitud de la velocidad máxima debe ser absolutamente igual en los diferentes laboratorios. La velocidad de la luz, como sabemos, se caracteriza por estas mismas propiedades.

De esta manera, la velocidad de la luz no es simplemente la velocidad de propagación de un fenómeno de la naturaleza. Esta velocidad, al mismo tiempo, juega el importantísimo papel de velocidad máxima.

El descubrimiento de la existencia en el mundo de la velocidad máxima es uno de los triunfos más grandes del pensamiento humano y de las posibilidades experimentales del hombre.

El físico del siglo pasado no podía llegar a pensar que en el mundo existiera la velocidad máxima y que el hecho de su existencia pudiera ser demostrado. Es más, si incluso en sus experimentos hubiese chocado con la existencia en la naturaleza de la velocidad máxima, este físico no podría estar seguro de que es una ley de la naturaleza, y no la consecuencia de la limitación de las posibilidades experimentales, la cual puede ser eliminada en el proceso del desarrollo ulterior de la técnica.

El principio de la relatividad demuestra, que la existencia de la velocidad máxima se deriva de la naturaleza misma de las cosas. Esperar que el progreso de la técnica cree la posibilidad de alcanzar velocidades que superen la velocidad de la luz es tan ridículo, como suponer que la ausencia en la superficie terrestre de puntos que estén separados por distancias mayores de 20 mil kilómetros no es una ley geográfica sino lo limitados que son nuestros conocimientos, y tener esperanzas de que a medida que se desarrolle la geografía, lograremos encontrar dos puntos en la Tierra que estén aún más separados.

La velocidad de la luz juega un papel tan extraordinario en la naturaleza, porque es la velocidad máxima de propagación de todo lo que sea. La luz, bien adelanta a cualquier otro fenómeno o bien llega conjuntamente con él.

Si el Sol se partiera en dos partes y formara una estrella doble, entonces, está claro, que también cambiaría el movimiento de la Tierra.

El físico del siglo pasado, que ignoraba la existencia en la naturaleza de la velocidad máxima, supondría, indudablemente, que el cambio del movimiento de la Tierra ocurriría inmediatamente después de partirse el Sol. Y, sin embargo, la luz necesitaría ocho minutos para llegar desde el Sol partido hasta la Tierra.

No obstante, el cambio en el movimiento de la Tierra, en realidad, comenzaría también solamente transcurridos ocho minutos después de haberse partido el Sol, y hasta este momento, la Tierra se movería como si éste no se hubiese partido. Y, en general, ningún acontecimiento que ocurra con el Sol, o en el Sol, ejercerá influencia alguna sobre la Tierra ni sobre el movimiento de ésta, hasta haber expirado los ocho minutos.

Claro está, que la velocidad final de propagación de la señal no nos priva de la posibilidad de establecer la simultaneidad de dos acontecimientos. Para ello, solamente debe tenerse en cuenta, como generalmente se hace, el tiempo en que se retarda la señal.

Sin embargo, semejante procedimiento para establecer la simultaneidad es ya completamente compatible con la relatividad de este concepto. En realidad, para calcular el tiempo de retraso debemos dividir la distancia entre los puntos en que ocurrieron los acontecimientos, por la velocidad de propagación de la señal. Por otra parte, al analizar el problema del envío de las cartas desde el rápido Moscú-Vladivostok, vimos que ¡el mismo sitio en el espacio es un concepto también muy relativo!

Antes y después

Supongamos que en nuestro tren con la bombilla que se enciende, y que en lo sucesivo llamaremos tren de Einstein, se ha estropeado el mecanismo de las puertas automáticas y la gente del tren nota que la puerta de delante se abre 15 segundos antes que la de atrás. La gente en el andén de la estación verá que, al contrario, la puerta de atrás se abre 40-15=25 segundos antes. De esta manera, aquello que para un laboratorio tuvo lugar antes, para otro laboratorio puede ocurrir después.

Sin embargo, inmediatamente surge la idea de que semejante relatividad de los conceptos "antes" y "después" debe tener sus límites. Así, por ejemplo, es muy difícil admitir (desde el punto de vista de cualquier laboratorio), que un niño nazca antes que su madre.

En el Sol se formó una mancha. Al cabo de ocho minutos esta mancha la vio un astrónomo que obser-

vaba el Sol con un telescopio. Todo lo que haga el astrónomo después de esto, será absolutamente después de haber aparecido la mancha (después, desde el punto de vista de cualquier laboratorio desde el que se observan la mancha del Sol y al astrónomo). Por el contrario, todo lo que ocurrió con el astrónomo ocho minutos antes del surgimiento de la mancha (de tal forma, que la señal de la luz sobre este acontecimiento llegase al Sol antes de que apareciese la mancha) ocurrió absolutamente antes.

Si el astrónomo, por ejemplo, se puso las gafas en el momento comprendido entre estos dos límites, la correlación temporal entre la aparición de la mancha y el ponerse las gafas el astrónomo ya no será absoluta.

Nosotros podemos movernos respecto al astrónomo y a la mancha de tal forma que, en dependencia de la velocidad y dirección de nuestro movimiento, veamos al astrónomo poniéndose las gafas antes, después o al mismo tiempo que aparece la mancha.

De tal manera, el principio de la relatividad demuestra que las relaciones temporales entre. los acontecimientos pueden ser de tres tipos: absolutamente antes, absolutamente después y "ni antes ni después", mejor dicho, antes o después, según cual sea el laboratorio desde el que se observan estos acontecimientos.

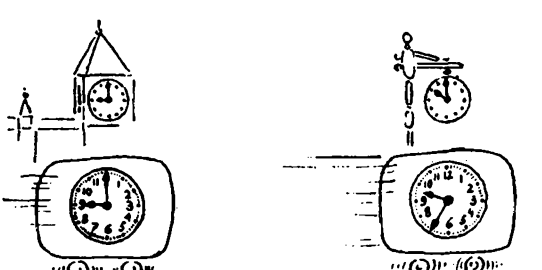
Capítulo quinto

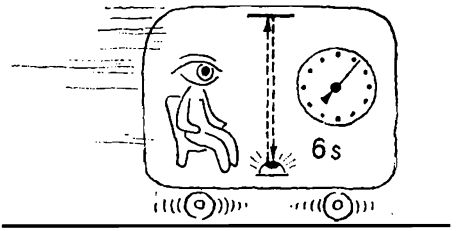
LOS RELOJES Y LAS LINEAS ESTAN CAPRICHOSOS

De nuevo nos sentamos en el tren

Ante nosotros tenemos un 'ferrocarril muy largo por el que marcha el tren de Einstein. La distancia entre dos estaciones es de 864 000 000 kilómetros. A una velocidad de 240 000 kilómetros por segundo, el tren de Einstein necesitará una hora para recorrer esta distancia.

En ambas estaciones hay relojes. En la primera estación entra un viajero en el vagón y antes de salir el tren comprueba su reloj con el de la estación. Al llegar a la otra estación, el pasajero ve con asombro





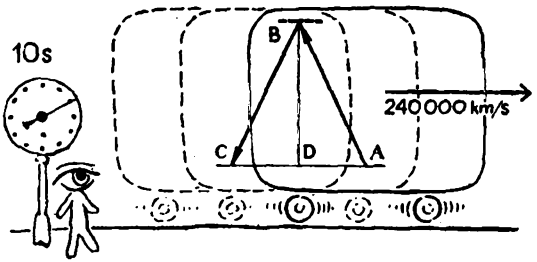
que su reloj se retrasó. En la relojería aseguran al pasajero que su reloj está en perfecto estado..

¿Qué es lo que pasa?

Para analizar esto, supongamos que el pasajero envía, con una linterna que está puesta en el suelo del tren, un rayo de luz al techo de éste. En el techo del tren hay un espejo, en el que el rayo de luz se refleja hacia la bombilla de la linterna. La trayectoria del rayo, tal como la ve el pasajero en el vagón, se muestra en la parte superior del dibujo de la pág. 52. Para el observador que se encuentra en la estación la trayectoria es'completamente diferente. En el tiempo que tarda el rayo de luz en recorrer el trayecto que hay desde la bombilla hasta el espejo, este último, debido al movimiento del tren, se desplazará. Mientras el rayo de luz retorna, la bombilla se desplazará todavía otro tanto.

Como vemos, para los observadores del andén, la luz, evidentemente, recorrió una distancia mayor que para los observadores del tren. Por otra parte, nosotros sabemos que la velocidad de la luz es velocidad absoluta: es igual, tanto para aquellos que viajan en el tren, como para los que se encuentran en el andén. Este hecho nos obliga a sacar una conclusión: ¡entre el envío y el regreso del rayo de luz, en el andén transcurrió más tiempo que en el tren!

No es difícil calcular la relación de los tiempos.



Supongamos que el observador del andén estableció, que entre el envío y el regreso del rayo de luz transcurrieron 10 segundos. Durante estos 10 segundos, la luz recorrió una distancia 300 000 x 10=3 000 000 kilómetros. De aquí se deduce que cada uno de los lados AB y BC del triángulo isósceles ABC es de 1 500 000 kilómetros. El lado AC es igual, por lo visto, al camino recorrido por el tren en 10 segundos, es decir, 240 000 x 10=2 400 000 kilómetros.

Ahora es fácil determinar la altura del vagón, que será la altura BD del triángulo ABC.

Recordemos que, en el triángulo rectángulo, el cuadrado de la hipotenusa (AB) es igual a la suma de los cuadrados de los catetos (AD y BD). De la igualdad: $AB^2=AD^2+BD^2$ se deduce que la altura del vagón $BD=\sqrt{AB^2-AD^2}=\sqrt{1\,500\,000^2-1\,200\,000^2}=$ =900 000 kilómetros. La altura es sumamente grande, lo que, por cierto, no es extrañable por las dimensiones astronómicas del tren de Einstein.

El camino recorrido por el rayo de luz desde el suelo del vagón hasta el techo de éste y en dirección contraria, desde el punto de vista del pasajero, es igual, por lo visto, a la altura duplicada, es decir, a 2 x x 900 000=1 800 000 kilómetros. Para recorrer este camino la luz necesita $\frac{1\,800\,000}{300\,000}=6$ segundos.

El reloj se atrasa sistemáticamente

Así pues, mientras que en el andén transcurrieron 10 segundos, en el tren transcurrieron solamente 6. Es decir, si respecto a la hora de la estación, el tren llegó una hora después de haber salido, por la hora del reloj del pasajero pasaron solamente $60 \times \frac{6}{10} = 36$ minutos. Con otras palabras, el reloj del pasajero se retrasó durante el transcurso de una hora en 24 minutos, respecto al reloj del andén.

No es difícil darse cuenta de que el retraso del reloj será tanto más considerable, cuanto mayor sea la velocidad del tren.

En efecto, cuanto más próxima sea la velocidad del tren a la de la luz, tanto más cerca estará el cateto AD, que representa el camino recorrido por el tren, de la hipotenusa AB, que representa el recorrido por la luz en el mismo tiempo, Conforme a esto, la relación entre el cateto BD y la hipotenusa disminuye. Pero esta relación es precisamente la existente entre el tiempo en el tren y en la estación. Aproximando la velocidad del tren a la de la luz podemos lograr que en una hora del tiempo de la estación, en el tren transcurra un intervalo de tiempo tan pequeño como se quiera. Así, por ejemplo, cuando la velocidad del tren sea igual a 0,9999 de la velocidad de la luz, en una hora del tiempo de la estación, el tiempo transcurrido en el tren será solamente de un minuto.

De esta manera cualquier reloj en movimiento se atrasa respecto a los relojes en reposo. ¿No contradice este resultado al principio de la relatividad del movimiento del cual partimos?

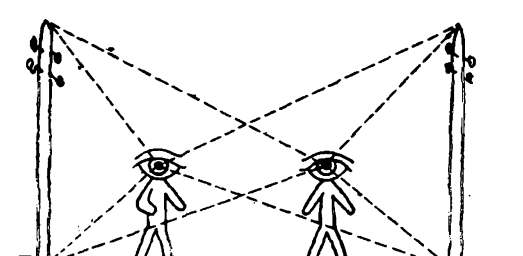
¿No significa esto que aquellos relojes que andan más rápidamente que los demás son los que se encuentran en reposo absoluto?

No, porque la comparación del reloj del tren con los relojes de las estaciones se efectuó en condiciones completamente inequivalentes. ¡Es que había tres relojes en lugar de dos! El pasajero comparaba su reloj con dos relojes diferentes en estaciones diferentes. Y, por el contrario, si en el vagón delantero y en el de atrás se instalasen relojes, el observador de una de las estaciones, al comparar las indicaciones del reloj de la estación con las de los relojes en las ventanas del tren, que pasaba rápidamente ante él, observaría que el reloj de la estación se retrasaba sistemáticamente.

En este caso, al desplazarse el tren rectilínea y uniformemente respecto a la estación, tenemos derecho a considerar al tren como inmóvil y a la estación como si estuviera en movimiento. Las leyes de la naturaleza en ambos deben ser idénticas.

Cualquier observador, inmóvil respecto a su reloj, verá que se adelantan los relojes que se desplazan respecto a él, y que esta aceleración es mayor, a medida que aumente la velocidad con la que se mueven.

Esta. situación es análoga a aquella, en la que cada uno de los observadores, que se encuentran junto a los postes de telégrafo, afirmaría que su poste se ve bajo un ángulo superior al ángulo desde el que se ve el poste del otro.



Figurémonos ahora que el tren de Einstein corre por una línea de circunvalación, y que pasado un tiempo determinado regresa a la estación de salida. Como ya establecimos, el pasajero observará que su reloj se retrasa, y que este retraso es tanto mayor, cuanto mayor sea la velocidad del movimiento del tren. Aumentando la velocidad del tren de Einstein en la línea de circunvalación del ferrocarril se puede alcanzar una situación tal, en la que, mientras que para el pasajero transcurrió solamente un día, para el jefe de la estación transcurrieron muchos años. Pasadas 24 horas (¡por su reloj!), al regresar a su casa de la estación de la línea de circunvalación del ferrocarril de la que partió nuestro pasajero, se enterará de que todos sus parientes y conocidos se murieron hace mucho tiempo.

A diferencia de la excursión entre dos estaciones, en la que el pasajero comprueba su reloj por relojes diferentes, aquí, en el itinerario de circunvalación, se comparan ya solamente las indicaciones de dos relojes y no de tres: del reloj del tren y del reloj de la estación de salida.

¿No habrá en esto contradicción con el principio de la relatividad? ¿Se puede considerar o no que el pasajero se encuentra en reposo y que la estación de salida se desplaza por la circunferencia a la velocidad del tren de Einstein? Entonces llegaríamos a la conclusión de que, mientras que para los hombres de la estación transcurre un día, para los pasajeros del tren transcurrirán muchos años. Semejante razonamiento sería, sin embargo, injusto por lo siguiente.

A su tiempo ya aclaramos, que se puede considerar cuerpo en reposo solamente aquel sobre el que no actúa ninguna fuerza. Es verdad que no existe un solo

"reposo" sino una infinidad de ellos, y que dos cuerpos en reposo pueden desplazarse uno respecto al otro, como ya sabemos, rectilínea y uniformemente. Pero sobre el reloj del tren de Einstein, que corre por el ferrocarril de circunvalación, actúa a ciencia cierta la fuerza centrífuga y, por lo tanto, en ningún caso lo podemos considerar en estado de reposo. En este caso, la diferencia entre las indicaciones del reloj en reposo de la estación y del reloj del tren de Einstein, es absoluta.

Si dos hombres tienen relojes que marquen un mismo tiempo se separan y, pasado cierto tiempo, se vuelven a encontrar de nuevo, el reloj de aquel que reposaba o se movía rectilínea y uniformemente marcará más tiempo, es decir, marcará más tiempo aquel reloj sobre el que no actúa fuerza alguna.

El viaje por el ferrocarril de circunvalación a una velocidad próxima a la de la luz, nos crea la posibilidad por principio, aunque en grado limitado, de verificar la "máquina del tíempo" de Wells: al llegar de nuevo a la estación de partida descubriremos que nos encontramos en el futuro; Es verdad que en esta máquina del tiempo podemos partir para el futuro, pero estamos privados de la posibilidad de regresar al pasado. Y en esto estriba su gran diferencia de la máquina del tiempo de Wells.

Es en vano, incluso, tener esperanzas de que el desarrollo sucesivo de la ciencia nos permitirá viajar al pasado. De lo contrario, tendríamos que reconocer posibles las situaciones más absurdas. En efecto, viajando al pasado podríamos encontrarnos en la situación absurda del hombre cuyos padres todavía no habían aparecido en la Tierra. Por el contrario, el viaje al futuro encierra en sí solamente contradicciones aparentes.

Excursión a una estrella

En el cielo hay estrellas situadas a tales distancias de nosotros, por ejemplo, que el rayo de luz las recorre en 40 años. Por cuanto ya sabemos que el movimiento a una velocidad superior a la de la luz es imposible, sería permisible llegar a la conclusión de que no se puede alcanzar esta estrella en un plazo de tiempo inferior a 40 años. Semejante razonamiento, sin embargo, es incorrecto, ya que no tiene en cuenta el cambio del tiempo relacionado con el movimiento.

Supongamos que volamos hacia la estrella en el cohete de Einstein a la velocidad de 240 000 kilómetros por segundo. Para los habitantes de la Tierra, alcanzaríamos la estrella transcurridos $\frac{300\,000 \times 40}{240\,000} = 50$ años.

Para nosotros, que volamos en el cohete de Einstein este tiempo se reducirá, a la velocidad de vuelo mencionada, a la relación de 10 : 6. Por consiguiente, nosotros alcanzaremos la estrella no dentro de 50 años, sino dentro de $\frac{6}{10} \times 50 = 30$ años.

Aumentando la velocidad del cohete de Einstein y aproximándola a la de la luz, se puede reducir en cuanto se quiera el tiempo necesario para llegar los viajeros hasta la lejana estrella. Teóricamente en un vuelo suficientemente veloz se podría alcanzar la estrella y regresar de nuevo a la Tierra, si se quiere, ¡en un minuto! En la Tierra, sin embargo, habrían transcurrido de todas maneras 80 años.

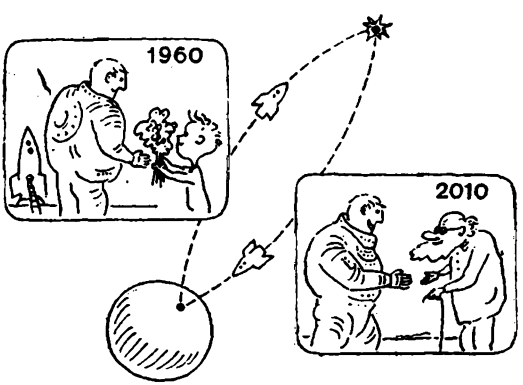
Puede parecer que con esto se abren posibilidades de prolongar la vida humana. Aunque solamente desde el punto de vista de otros seres, pues el hombre envejece de acuerdo con "su" tiempo. Sin embargo, por des-

gracia, al examinar más de cerca estas perspectivas resultan ser más que míseras.

Comencemos por qué el organismo humano no está adaptado para permanecer en condiciones de aceleración prolongada, que supere sensiblemente la aceleración terrestre de la fuerza de gravedad. Por esto, para tomar carrera hasta la velocidad aproximada a la de la luz, se requiere un tiempo muy prolongado. Los cálculos demuestran, que en un viaje de medio año y una aceleración igual a la aceleración terrestre de la fuerza de gravedad, se puede ganar solamente mes y medio. Si se alarga este viaje, la ganancia de tiempo crecerá rápidamente. Volando un año en un cohete, se puede ganar año y medio complementariamente; el viaje de dos años nos proporciona 28 años, y en tres años de nuestra estancia en el cohete ten la Tierra transcurrirán más de 360 años!

Las cifras parecen suficientemente consoladoras.

La cosa está peor en lo referente al gasto de energía. La energía del cohete, que tiene un peso sumamente modesto, de 1 t, y que vuela a una velocidad de -260 000 kilómetros por segundo (semejante velocidad



es indispensable para "duplicar" el tiempo, es decir, para que por cada año de viaje en el cohete transcurran dos años en la Tierra) es igual a 250 000 000 000 000 kilovatios-hora. Tanta energía se produce en todo el globo terrestre sólo durante muchos años.

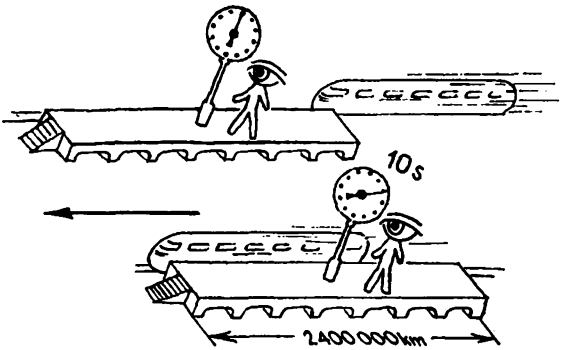
Mas hemos calculado solamente la energía del cohete en el vuelo. ¡No tuvimos en cuenta que previamente se requiere acelerar nuestro aparato hasta la velocidad de 260 000 kilómetros por segundo! Y al terminar el vuelo tendremos que frenar el cohete para que no sea peligroso aterrizar. ¿Cuánta energía se necesitará para esto?

Aunque dispusiéramos de un combustible capaz de proporcionar un chorro que saliera del motor del cohete a la velocidad máxima posible, es decir, a la velocidad de la luz, la cantidad de esta energía debería superar 200 veces la calculada anteriormente. Esto quiere decir, que deberíamos gastar tanta energía como produce la humanidad durante varias decenas de años. La velocidad real del chorro de los motores de los cohetes es decenas de miles de veces inferior a la velocidad de la luz. Y esto hace inverosímilmente superiores los gastos de energía necesarios para nuestro vuelo imaginario.

Los objetos se reducen

Así es que el tiempo, como acabamos de convencernos, ha sido derribado de su pedestal de concepto absoluto, es decir, tiene sentido relativo, lo cual exige indicar exactamente aquellos laboratorios en los que se efectúa la medición.

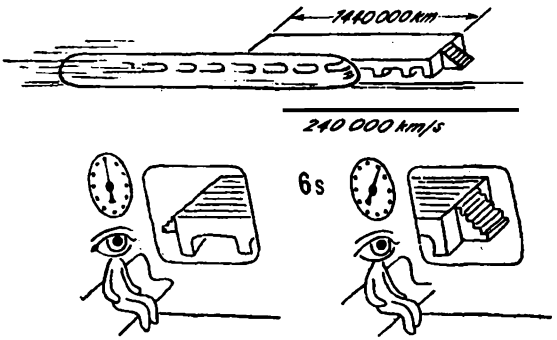
Recurramos ahora al espacio. Antes de describir el experimento de Michelson habíamos aclarado que el espacio es relativo. A pesar de la relatividad del espacio, nosotros atribuíamos a las dimensiones de los cuer-



pos carácter absoluto, es decir, creíamos que éstas eran propiedades del cuerpo y no dependían del laboratorio desde el que se efectuaba la observación. Y sin embargo, la teoría de la relatividad nos obliga a despedirnos también de tal convicción. Esta, igual que la idea sobre el tiempo absoluto, es simplemente un prejuicio, que surge como resultado de que nosotros siempre tenemos que ver con velocidades ínfimas, en comparación con la velocidad de la luz.

Supongamos que el tren de Einstein pasa rápidamente a lo largo del andén de la estación, que tiene una longitud de 2 400 000 kilómetros.

¿Estarán conformes con esta afirmación los pasajeros en el tren de Einstein? Según la indicación del reloj de la estación, el tren recorrerá la distancia de un extremo del andén hasta el otro en $\frac{2\,400\,000}{240\,000} = 10$ segundos. Pero los pasajeros tienen sus relojes, y, de acuerdo con éstos, el movimiento del tren desde un extremo del andén hasta el otro durará menos tiempo. Como ya sabemos será igual solamente a 6 segundos. Por Consiguiente, los pasajeros llegarán a la conclusión, con pleno derecho, que la longitud del andén no es de



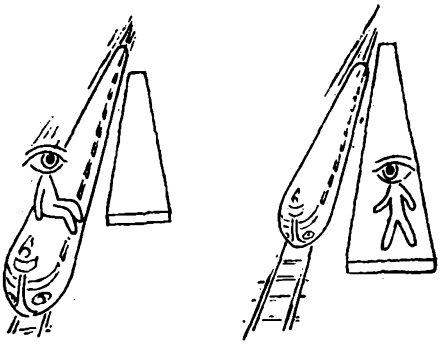
2 400 000 kilómetros, sino de 240 000 x 6=1 440 000 kilómetros.

Como vemos, la longitud del andén, desde el punto de vista del laboratorio que está en reposo respecto al mismo, es mayor que desde el punto de vista de otro laboratorio respecto al cual se mueve el andén. Cualquier cuerpo que se encuentra en movimiento se reduce en la dirección del movimiento.

Sin embargo, esta reducción de ninguna manera es índice de lo absoluto del movimiento: es suficiente meterse en un laboratorio, que esté en reposo respecto al cuerpo, y éste de nuevo se alargará. De esta misma manera, los pasajeros estimarán que el andén se ha reducido, y a los hombres que se encuentren en éste les parecerá que se redujo el tren de Einstein (en la relación 6 : 10).

Y esto no será un engaño de la vista. Lo mismo indicarán todos los instrumentos que puedan usarse para medir la longitud de los cuerpos.

Con motivo de haber descubierto la reducción de los objetos, debemos ahora introducir la corrección necesaria en nuestros razonamientos de la pág. 42, sobre el tiempo de abertura de las puertas en el tren



de Einstein. Precisamente, cuando calculábamos el momento de la abertura de las puertas, desde el punto de vista de los observadores del andén de la estación, creíamos que la longitud del tren en marcha sería igual a la del tren en reposo. Sin embargo, para la gente del andén, la longitud del tren se redujo. Correspondientemente a esto, el intervalo de tiempo real entre la abertura de las puertas, desde el punto de vista del reloj de la estación, será igual, en realidad, no a 40 segundos, sino solamente a $\frac{6}{10} \times 40 = 24$ segundos.

Para las deducciones, anteriores esta corrección, claro está, es insignificante.

Los dibujos de la pág. 64 muestran el tren de Einstein y el andén tal como se presentan a los observadores en la estación y en el tren. Como vemos en el dibujo de la derecha el andén es más largo que el tren, y en el de la izquierda, el tren es más largo que el andén.

¿Cuál de estos dibujos corresponde a la realidad?

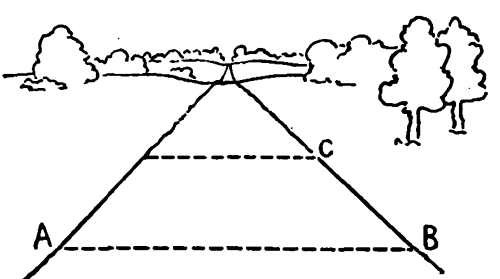
La pregunta está tan privada de sentido, como lo estaba la pregunta sobre el pastor y la vaca de la pág. 11

Tanto uno como el otro son dibujos de una misma realidad objetiva, "fotografiada" desde diferentes puntos de vista.

Las velocidades están caprichosas

¿A qué velocidad se desplaza el pasajero respecto a la vía del ferrocarril, si camina hacia la cabeza del tren a una velocidad de 5 kilómetros por hora y el tren marcha a 50 kilómetros por hora? Está claro, que la velocidad del pasajero respecto a la vía del ferrocarril es igual a 50+5=55 kilómetros por hora. Les razonamientos que empleamos para hallar la velocidad están basados en la ley de la suma de velocidades y no surge duda alguna sobre la justeza de esta ley. En efecto, en una hora el tren recorrerá 50 kilómetros y el pasajero en el tren caminará cinco kilómetros más. En total, los 55 kilómetros de que ya hablamos.

Es completamente comprensible, que la existencia en el mundo-de la velocidad máxima priva a la ley de la suma de velocidades de poder ser empleada universalmente para velocidades grandes y pequeñas. Si el pasajero camina en el tren de Einstein a una velocidad, digamos, de 100 000 kilómetros por segundo, su velo-



cidad respecto a la vía férrea no puede ser igual a 240 000+100 000=340 000 kilómetros por segundo, ya que esta velocidad excede de la máxima de la luz y, por lo tanto, no puede existir en la naturaleza.

De este modo, la ley de la suma de velocidades, que usamos en nuestra vida cotidiana resulta inexacta. Esta ley es justa solamente para velocidades suficientemente pequeñas, en comparación con la velocidad de la luz.

El lector, acostumbrado ya a toda clase de paradojas de la teoría de la relatividad, comprenderá fácilmente la causa por la que es inaplicable el razonamiento, al parecer evidente, con ayuda del cual acabamos de deducir la ley de la suma de las velocidades. Para ello hemos sumado las distancias que recorrieron en una hora el tren por la vía férrea y el pasajero en el tren. Pero la teoría de la relatividad nos enseña que estas distancias no pueden ser sumadas. El hacer esto sería tan absurdo, como si para determinar el área del campo mostrado en la pág. 65 multiplicásemos las longitudes de los segmentos AB y BC, olvidando que el último, debido a la perspectiva, está deformado en el dibujo. Además, para determinar la velocidad del pasajero respecto a la estación, debemos determinar el camino recorrido por él en una hora del tiempo de la estación, mientras que para establecer la velocidad del pasajero en el tren hemos utilizado el tiempo del tren, lo que, como ya sabemos, no es lo mismo.

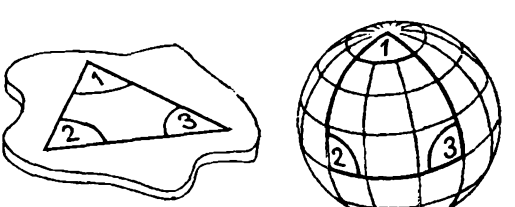
Todo esto conduce a que las velocidades, una de las cuales, por lo menos, es comparable con la velocidad de la luz, se sumen de manera completamente diferente a la acostumbrada. Esta suma paradójica de las velocidades puede verse en el experimento, cuando observamos, por ejemplo, la propagación de la luz en el agua corriente (sobre lo que ya hablamos anterior-

mente). La circunstancia de que la velocidad de propagación de la luz en el agua corriente no sea igual a la suma de la velocidad de la luz en el agua tranquila y de la velocidad del movimiento del agua, sino inferior a esta suma, es el resultado directo de la teoría de la relatividad.

Es, sobre todo, muy singular, la forma como se suman las velocidades, en el caso cuando una de ellas es exactamente igual a 300 000 kilómetros por segundo. Esta velocidad, como ya sabemos, posee la propiedad de mantenerse invariable no importando cómo se muevan los laboratorios en los que la observamos. Con otras palabras, cualquiera que sea la velocidad que se sume a los 300 000 kilómetros por segundo se obtendrá de nuevo la misma velocidad de 300 000 kilómetros por segundo.

La inaplicabilidad de la regla general de la suma de velocidades puede ser ilustrada con una simple analogía.

Como se sabe, en el triángulo plano (véase el dibujo de la izquierda en la pág. 67) la suma de los ángulos A, B, C es igual a dos ángulos rectos. Imaginémonos, sin embargo, un triángulo dibujado en la superficie de la Tierra (en el dibujo de la derecha en la pág. 67). Debido a la esfericidad de la Tierra, la



$\angle 1 + \angle 2 + \angle 3 = 180°$ $\angle 1 + \angle 2 + \angle 3 > 180°$

suma de los ángulos de semejante triángulo será ya superior a dos ángulos rectos. Esta diferencia se hace considerable solamente cuando las dimensiones del triángulo son comparables con las dimensiones de la Tierra.

De la misma manera que para medir áreas de terrenos pequeños de la Tierra se puede hacer uso de la planimetría, al sumar velocidades no grandes puede hacerse uso de la regla general de la suma de velocidades.

Capítulo sexto

EL TRABAJO CAMBIA A LA MASA

La masa

Supongamos que queremos obligar a moverse a cualquier cuerpo que está en reposo a una velocidad determinada. Para ello debemos aplicarle una fuerza. Entonces, si al movimiento no se le oponen fuerzas extrañas, como , por ejemplo, la fuerza del rozamiento, el cuerpo se pondrá en movimiento y se moverá con velocidad creciente. Transcurrido un intervalo de tiempo suficiente, podremos hacer llegar la velocidad del cuerpo hasta la magnitud necesaria. Al hacer esto veremos que, para comunicar a los diferentes cuerpos, con ayuda de la fuerza dada, la velocidad deseada, se requieren diferentes intervalos de tiempo.

Para abstraerse del rozamiento, supongamos que en el espacio mundial hay dos bolas de dimensiones iguales, una de las cuales es de plomo y la otra de madera. Vamos a tirar de cada una de estas bolas con una misma fuerza dada, hasta que ambas reciban la velocidad, por ejemplo, de diez kilómetros por hora.

Es evidente, que para alcanzar este resultado, a la bola de plomo se tendrá que aplicar una fuerza durante un intervalo de tiempo superior al requerido

para la bola de madera. Para caracterizar esta circunstancia, se dice que la bola de plomo tiene-mayor masa que la de madera. Puesto que, al aplicar una fuerza constante, la velocidad crece proporcionalmente al tiempo, como medida de la masa se toma la relación existente entre el tiempo necesario para alcanzar una velocidad dada desde el estado de reposo y esta misma velocidad. La masa es proporcional a esta relación, y, además, el coeficiente de proporcionalidad depende de la fuerza que causa el movimiento.

La masa crece

La masa es una de las propiedades más importantes de cualquier cuerpo: Nosotros estamos acostumbrados a que la masa de los cuerpos quede siempre invariable. En particular, la masa no depende de la velocidad. Esto se deduce de nuestra afirmación inicial, de que, al aplicar una fuerza constante, la velocidad crece proporcionalmente al tiempo de acción de esta fuerza.

Esta afirmación está basada en la regla general de la suma de velocidades. Sin embargo, acabamos de demostrar que esta regla no es aplicable en todos los casos.

¿Qué es lo que nosotros hacemos para obtener la magnitud de la velocidad al finalizar el 2° segundo de la acción de la fuerza? Pues sumamos la velocidad que el cuerpo tenía al finalizar el 1er segundo con la velocidad que adquirió éste durante el segundo siguiente, de acuerdo a la regla general de la suma de velocidades.

Pero así se puede proceder solamente mientras las velocidades adquiridas no sean comparables con la velocidad de la luz. En este caso ya no se puede emplear la regla vieja. Al sumar velocidades tomando

en consideración la teoría de la relatividad, obtendremos siempre un resultado un poco inferior al que obtendríamos si empleáramos la mencionada regla. Y esto significa, que con magnitudes grandes de la velocidad ya alcanzada, ésta no crecerá proporcionalmente al tiempo de acción de la fuerza, sino más lentamente. Esto es comprensible, puesto que existe la velocidad máxima.

A medida que la velocidad del cuerpo se aproxima a la velocidad de la luz, su crecimiento, siendo la fuerza invariable, es cada vez más lento y, por lo tanto, la velocidad máxima nunca será superada.

Mientras que se presentaba la posibilidad de afirmar que la velocidad del cuerpo crece proporcionalmente al tiempo de acción de la fuerza, la masa podía considerarse independiente de la velocidad del cuerpo. Pero cuando la velocidad del cuerpo llega a ser comparable con la velocidad de la luz, la proporcionalidad entre el tiempo y la velocidad del cuerpo desaparece, y la masa comienza a depender de la velocidad. Y como el tiempo de aceleración crece ilimitadamente y la velocidad no puede superar la magnitud máxima, nosotros vemos que la masa crece conjuntamente con la velocidad, alcanzando una magnitud ilimitada, cuando la velocidad del cuerpo llega a ser igual a la velocidad de la luz. El cálculo demuesra, que la masa del cuerpo en movimiento crece en tantas veces, en cuantas disminuye su longitud con el movimiento, Y de esta forma, la masa del tren de Einstein, que marcha a una velocidad de 240 000 kilómetros por segundo, es $\frac{10}{6}$ veces superior a la masa de un tren en reposo.

Es completamente natural, que cuando tenemos que ver con velocidades normales, pequeñas en comparación con la velocidad de la luz, se pueda prescindir

del cambio de la masa, igual que prescindimos de la dependencia de las dimensiones del cuerpo de su velocidad, o prescindimos de la dependencia del intervalo de tiempo entre dos acontecimientos de las velocidades a las que se mueven los observadores de estos acontecimientos.

La dependencia entre la masa y la velocidad, que se deduce de la teoría de la relatividad, puede comprobarse directamente en el experimento, observando el movimiento de los electrones rápidos.

En las condiciones experimentales actuales, el electrón, que se mueve a una velocidad próxima a la velocidad de la luz, no es una cosa extraordinaria, sino más bien normal. En acelerados especiales, los electrones se impulsan hasta velocidades que se diferencian de la velocidad de la luz en menos de 30 kilómetros por segundo.

Así, la física contemporánea es capaz de comparar la masa de los electrones que se mueven a una velocidad enorme, con la masa de los electrones en reposo. Los resultados de los experimentos confirmaron totalmente la dependencia entre la masa y la velocidad, que se deduce del principio de la relatividad.

¿Cuánto cuesta un gramo de luz?

El incremento de la masa del cuerpo está ligado estrechamente al trabajo que se efectuó sobre él y es proporcional al trabajo necesario para poner al cuerpo en movimiento. Además, no es necesario gastar trabajo solamente para poner en movimiento al cuerpo. Cualquier trabajo efectuado sobre el cuerpo, cualquier aumento de la energía del cuerpo, aumenta su masa. Por esto, por ejemplo, el cuerpo calentado tiene mayor masa que el cuerpo frío, el resorte contraído tiene mayor masa que el resorte

aflojado. Es verdad que el coeficiente de proporcionalidad entre el cambio de la masa y el cambio de la energía es insignificante, y para aumentar la masa de un cuerpo en un gramo, se necesita comunicar a este cuerpo una energía de 25 millones de kilovatios-hora.

Y por eso es precisamente por lo que el cambio de masa de los cuerpos, en condiciones normales, es sumamente insignificante y se escapa de las mediciones más exactas. Así, por ejemplo, el calentamiento de una tonelada de agua desde cero grados centígrados hasta la ebullición, provocará el. aumento de su masa aproximadamente en cinco millonésimas de gramo.

Si quemamos una tonelada de carbón en un horno cerrado, los productos de la combustión, después de enfriados, tendrán una masa menor solamente en una tresmilésima parte de gramo que la masa del carbón y del oxígeno de los que se formaron. La masa que falta se va con el calor desprendido.

Sin embargo, la física contemporánea conoce también fenómenos en los que el cambio de la masa de los cuerpos juega un papel considerable. Estos son los fenómenos que tienen lugar al chocar los núcleos de los átomos, cuando de unos núcleos se forman otros. Así, por ejemplo, al chocar el núcleo del átomo de litio con el núcleo del átomo de hidrógeno, cuyo resultado es la formación de dos átomos de helio, la masa cambia en $\frac{1}{400}$ de su magnitud.

Ya habíamos dicho, que para aumentar la masa del cuerpo en un gramo se debe comunicar a éste una energía de 25 millones de kilovatios-hora. De aquí se deduce que, al transformar un gramo de la mezcla de litio e hidrógeno en helio, se desprende una cantidad de energía menor 400 veces: ¡ $\frac{25\,000\,000}{400} =$ =60 000 kilovatios-hora!

Contestemos ahora a esta pregunta: ¿qué sustancia de las que se encuentran en la naturaleza, es la más cara (tomada en peso)?

El radio ha sido aceptado como la sustancia más cara; un gramo valía hace poco unos 25 000 rublos.

Calculemos, sin embargo, el coste de... la luz.

En las bombillas eléctricas solamente $\frac{1}{20}$ de la energía se obtiene en forma de luz visible. Por esto, un gramo de luz corresponde a una cantidad de trabajo 20 veces superior a 25 millones de kilovatios-hora, es decir, corresponde a 500 millones de kilovatios-hora. Esto significa, contando incluso un kopeck por cada kilovatio-hora, 500 000 rublos. Así que el gramo de luz es veinte veces más caro que el gramo de radio.

CONCLUSIONES

Pues bien, experimentos serios y convincentes nos obligan a reconocer la justeza de la teoría de la relatividad, que descubre propiedades asombrosas del mundo que nos rodea, propiedades que se nos escapan al estudiarlas inicialmente, mejor dicho, superficialmente.

Hemos visto qué cambios tan profundos y radicales introduce la teoría de la relatividad en los conceptos y nociones principales, creados por la humanidad durante siglos y basados en la experiencia de la vida cotidiana.

¿No significa esto una quiebra completa de las nociones habituales?

¿No significa esto que toda la física creada antes de aparecer el principio de la relatividad queda borrada y se la tira como a un zapato viejo que en su tiempo prestó su servicio, pero que ahora ya no lo necesita nadie?

Si la cosa estuviese así planteada sería inútil dedicarse a las investigaciones científicas. Nunca se podrá estar seguro de que en el futuro no aparezca una ciencia nueva que derrumbe completamente a la ciencia vieja.

Supongamos, sin embargo, que al pasajero que

viaja en un tren corriente, aunque sea un rápido, y no en el tren de Einstein, se le ocurriera introducir una corrección conforme a la teoría de la relatividad, temiendo que, de lo contrario, su reloj se retrase respecto al de la estación. A semejante pasajero le pondríamos en ridículo. En efecto, pues, sin hablar ya de que la corrección consiste en una parte infinitamente pequeña de segundo, la influencia sobre el mejor reloj incluso de una sola sacudida del tren, es muchas veces superior.

El ingeniero químico que dude sobre si queda constante la masa del agua al calentarla, es evidente que está mal de la cabeza. Pero, en cambio, el físico, que observa el choque de los núcleos atómicos y no tiene en cuenta el cambio de la masa durante las transformaciones nucleares, debe ser echado del laboratorio por ignorante.

Los constructores proyectan y seguirán proyectando sus motores haciendo uso de las leyes viejas de la física, puesto que la corrección de la teoría de la relatividad ejerce menos influencia sob e sus máquinas que un microbio que, digamos, se posara en el volante de un vehículo. Sin embargo, el físico que observa los electrones rápidos está obligado a tener en cuenta el cambio de la masa de los electrones con la velocidad.

Por lo tanto, la teoría de la relatividad no refuta, sino que profundiza los conceptos y nociones creados por la ciencia vieja y determina las fronteras en cuyos límites los viejos conceptos pueden ser empleados sin conducir a resultados falsos. Todas las leyes de la naturaleza descubiertas por los físicos antes del nacimiento de la teoría de la relatividad, no se anulan, sino que se trazan claramente los límites de su empleo.

La relación entre la Física que tiene en cuenta la teoría de la relatividad, llamada también Física Relativa, y la vieja Física, llamada Clásica, es aproxi-

madamente la misma que existe entre la Geodesia Superior, que toma en consideración la esfericidad de la Tierra, y la Geodesia Primaria, que prescinde de esta esfericidad. La Geodesia Superior debe partir de la relatividad del concepto de la vertical, la Física Relativa debe tener en cuenta la relatividad de las dimensiones del cuerpo y de los intervalos de tiempo entre dos acontecimientos, al contrario de la Física Clásica, para la cual esta relatividad no existe.

Igual que la Geodesia Superior es el desarrollo de la Primaria, la Física Relativa fue el desarrollo y la ampliación de la Física Clásica.

Nosotros podemos realizar el paso de las fórmulas de la Geometría Esférica, geometría en la superficie de un globo, a las fórmulas de la Planimetría, geometría en el plano, si creemos que el radio de la Tierra es infinitamente grande. La Tierra resultará ser entonces, no un globo, sino un plano infinito, la vertical recibirá un significado absoluto, la suma de los ángulos en el triángulo resultará ser exactamente igual a dos ángulos rectos.

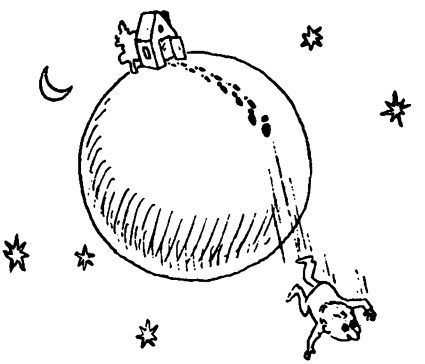
Podemos efectuar un paso análogo en la Física Relativa, si creemos que la velocidad de la luz es infinitamente grande, es decir, que la luz se propaga instantáneamente.

En efecto, si la luz se propaga instantáneamente, entonces, como ya vimos, el concepto de simultaneidad se convierte en concepto absoluto. Los intervalos de tiempo entre los acontecimientos y las dimensiones de los cuerpos adquieren sentido absoluto, sin relación con los laboratorios desde los que se observan.

Por consiguiente, todas las nociones clásicas pueden conservarse, si se considera infinita la velocidad de la luz.

Sin embargo, cualquier intento de combinar la velocidad finita de la luz con la conservación de las

nociones viejas sobre el espacio y el tiempo, nos sitúa en la posición ridícula del hombre, que sabe que la Tierra es esférica, pero que está seguro de que la vertical de la ciudad donde vive es la vertical absoluta y teme alejarse de su domicilio para no rodar como un trompo al espacio mundial.



INDICE

Capítulo I.
LA RELATIVIDAD A QUE ESTAMOS ACOSTUMBRADOS

¿Tiene sentido cualquier afirmación? 9
Derecha e izquierda 9
¿Que es ahora, de noche o de día? 10
¿Quién es más grande? 11
Lo relativo parece ser absoluto 12
Lo absoluto resultó ser relativo 13
El "sentido común" protesta 14

Capítulo II.
EL ESPACIO ES RELATIVO

¿Un mismo sitio o no? 16
¿Cómo se mueve en realidad un cuerpo?. 18
¿Son equivalentes o no todos los puntos de observación? . 19
¡El reposo ha sido encontrado! 20
El laboratorio en reposo 20
¿Se mueve o no el tren? 21
El reposo se ha perdido definitivamente 23
La ley de la inercia 24
¡La velocidad es también relativa! 25

Capítulo III.
LA TRAGEDIA DE LA LUZ

La luz no se propaga instantáneamente 27
¿Se puede cambiar la velocidad de la luz? 28

La luz y el sonido 28
El principio de la relatividad del movimiento parece ser quebrantado 29
"El éter mundial" 32
Se crea una situación difícil 33
El experimento debe resolver 34
El principio de la relatividad triunfa 36
Salir de las llamas y caer en las brasas 37

Capítulo IV.

EL TIEMPO RESULTA SER RELATIVO

¿Existe en realidad contradicción o no existe? . 39
Nos sentamos en el tren 41
El "sentido común" queda en ridículo . . . 42
El tiempo tiene la misma suerte que el espacio . 44
La ciencia triunfa 46
La velocidad tiene límite 47
Antes y después 50

Capítulo V.

LOS RELOJES Y LAS LINEAS ESTAN CAPRICHOSOS

De nuevo nos sentamos en el tren 52
El reloj se atrasa sistemáticamente 55
La máquina del tiempo 57
Excursión a una estrella 59
Los objetos se reducen 61
Las velocidades están caprichosas . 65

Capítulo VI.

EL TRABAJO CAMBIA A LA MASA

La masa 69
La masa crece 70
¿Cuánto cuesta un gramo de luz? . 72
Conclusiones 75

El académico LEV LANDAU fue laureado con los premios del Estado, de Lenin y Nobel, y autor de la obra Curso de Física Teórica, conocida mundialmente. Sus libros están dedicados a los fenómenos de la superconductividad, al origen de las lluvias de rayos cósmicos, a los problemas cardinales de la física de las partículas elementales y a los procesos en el plasma, etc. En los últimos años de su vida Landau trabajaba sobre la teoría de las partículas elementales, el problema más importante de la física moderna.

El doctor en ciencias físico-matemáticas, profesor YURY RUMER, es director del instituto de Radiofísica y Electrónica de la filial siberiana de la Academia de Ciencias de la URSS. Es conocido por sus trabajos en radiofísica y sus investigaciones en el dominio de los rayos cósmicos.